

RAZPRAVE

VPLIV PODNEBNIH SPREMEMB NA TEMPERATURO VODE V SLOVENIJI V 21. STOLETJU

AVTORJA

dr. Peter Frantar

Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova cesta 1b, SI – 1000 Ljubljana
peter.frantar@gov.si

Andrej Draksler

TC Vode, Tematski center za raziskave, študije in razvoj projektov na vodah, d. o. o., Trnovski pristan 10, SI – 1000 Ljubljana
andrej.draksler@tcvode.si

DOI: <https://doi.org/10.3986/GV94203>

UDK: 911.2:556.113:551.583(497.4)"20"

COBISS: 1.01

IZVLEČEK

Vpliv podnebnih sprememb na temperaturo vode v Sloveniji v 21. stoletju

Temperatura morja, površinskih in podzemnih voda v Sloveniji kaže v zadnjih desetletjih naraščajoč trend. Predvidevamo, da bodo podnebne spremembe tudi v prihodnje prav tako vplivale na temperaturo vode, zato smo ocenili njihov vpliv do konca 21. stoletja. Na izbranih vodomernih postajah smo ocenili povezanost med homogeniziranimi nizi temperature vode in temperature zraka na primerjalnih meteoroloških postajah ter pripravili regresijske modele (linearne ali nelinearne) za oceno temperature vode.

Izračunane modelske nize temperature zraka po treh podnebnih scenarijih smo vstavili v izdelane regresijske modele ter izračunali temperaturo vode do konca 21. stoletja. Analizo ocene temperature vode v Sloveniji do konca 21. stoletja smo izvedli za 57 vodomernih postaj na površinskih vodah, podzemnih vodah in na morju. Rezultati kažejo na nadaljevanje dviga povprečne letne temperature vode po vseh treh podnebnih scenarijih, predstavljena je letna in sezonska analiza sprememb temperature vode na izbranih postajah.

KLJUČNE BESEDE

hidrologija, temperatura vode, temperatura zraka, površinska voda, podzemna voda, morje, podnebne spremembe

ABSTRACT***Climate change impacts on water temperature in Slovenia in the 21st century***

Water temperature of the sea, surface and ground water has an increasing trend over the last decades in Slovenia. It is presumed that future climate changes will have an impact on water temperatures, therefore the impact by the end of the century was assessed with the use of air-water temperature correlation methodology. The correlation was assessed between homogenised air and water temperature datasets on comparable meteorological and hydrological stations. Regression models were then set up to estimate the water temperature based on climate scenarios data until the end of 21st century.

The analysis of water temperature by the end of 21st century was assessed for 57 stations on surface water, groundwater and at the sea. The results indicate the continuation of water temperature rise under all three climate change scenarios. The results of analysis show annual and seasonal change of water temperature for selected stations and the synthesis based on geographical characteristics.

KEY WORDS

hydrology, water temperature, air temperature, surface water, groundwater, sea, climate change

Uredništvo je prispevek prejelo 19. februarja 2022.

1 Uvod

Temperatura vode v rekah, jezerih in morjih ter temperatura podzemne vode je eden izmed kazalnikov podnebnih sprememb (Frantar 2004; Pletterbauer, Melcher in Graf 2018) in je eden najpomembnejših habitatnih dejavnikov v vodnih ekosistemi (Frantar 2012; po Baron s sodelavci 2003; Vodenik, Robič in Kobold 2008; Pletterbauer, Melcher in Graf 2018).

Raziskave sprememb temperature vode temeljijo na dveh metodoloških pristopih. Večinoma so opravljene na analizi trendov merjenih podatkov temperature vode, manj pa je analiz na podlagi rezultatov vpliva podnebnih sprememb po podnebnih scenarijih, kar je razvidno iz pregledane literature v nadaljevanju.

Pri raziskavah sprememb **temperature rek in jezer** je Evropska okoljska agencija (EEA 2009) že leta 2009 opozarjala na izzive naraščanja temperatur voda v Alpah kot vodnem stolpu Evrope zaradi vpliva podnebnih sprememb, predvsem kot posledico dviga temperature zraka in zmanjševanja količine padavin na južnem delu Alp. Podobne rezultate ima poročilo EEA iz leta 2017, kjer je opredeljen trend naraščanja temperature vode večjih evropskih rek in jezer v zadnjih 100 letih – porast med 1 in 3 °C (EEA 2017).

Večina analiz podnebnih sprememb se osredotoča na temperaturo zraka (tudi v tej reviji, na primer Hrvatin in Zorn 2017a; 2017b). Različni podnebni scenariji napovedujejo dvig temperature zraka povsod v sosednjih in bližnjih državah (Bertalanči s sodelavci 2018). Zaradi dobre korelacije temperature zraka in vode se posledično, ob uporabi predvidene naraščajoče temperature zraka po podnebnih scenarijih, napovedujejo tudi višje temperature vode, denimo za izbrana evropska jezera (Persson s sodelavci 2005; Arvola s sodelavci 2009; Perroud in Goyette 2010).

Analize trendov izmerjene temperature vode na območju Alp kažejo naraščanje temperature rek v Avstriji, Švici ter v porečjih Pada, Adiže in Rone (EEA 2009). Segrevajo se tudi jezera v Avstriji, kjer so z regresijsko analizo temperature vode ugotovili pozitiven trend do leta 2050 (Dokulil 2014). Na Hrvaškem so zaznali naraščanje temperatur Donave, Save in pritokov (Bonacci, Trninić in Roje-Bonacci 2008) ter potrdili naraščajoče trende na Dravi (Rabi, Hadzima-Nyarko in Šperac 2015).

Naraščanje temperature vode je bilo ugotovljeni tudi v poljskih Karpatih (reke Skawa, Raba, Vistula, Biala, San in Solinka), kjer so bili visoki trendi (okrog 1 °C na 10 let) potrjeni v vseh letnih časih z izjemo zime (Kędra 2020).

V Sloveniji so bile spremembe temperature vode preučevane sporadično. Dosedanje analize trendov temperature vode površinskih voda in analize temperaturnih režimov rek v Sloveniji (Frantar 2004; Vodenik, Robič in Kobold 2008; Frantar 2012; Draksler s sodelavci 2017) kažejo na naraščanje temperature vode, zato je zaradi vpliva podnebnih sprememb mogoče pričakovati spremembe tudi v prihodnje.

Vse dosedanje analize podatkov vodomernih postaj v Sloveniji so si enotne ter kažejo dvig srednje in najvišje letne temperature vode na vodotokih, jezerih in morju, sezonsko pa zvišanje v spomladanskih in poletnih mesecih (Frantar 2004; Vodenik, Robič in Kobold 2008; Draksler s sodelavci 2017; Draksler, Frantar in Savić 2018).

Podrobnejše analize temperature vode so bile izvedene na Bohinjskem jezeru, kjer je bilo ugotovljeno naraščanje temperatur vode (Frantar 2004; 2013), ugotovitve pa je potrdila analiza trendov iz leta 2017, ki je zajela celotno Slovenijo (Draksler s sodelavci 2017).

Leta 2017 je bila objavljena sezonska analiza trendov med letoma 1953 in 2015 na površinskih in podzemnih vodah, ki potrjuje tako letne kot sezonske poraste temperatur vode, ki so izrazitejši po letu 1990 (Draksler s sodelavci 2017; Draksler 2019).

Podrobnih analiz sprememb **temperature morja** samo za slovensko morje ni, je pa več del, ki obravnavajo dvig temperature morja. Dvig povprečne letne in sezonskih temperatur morja so potrdile Vodenikova, Robičeva in Koboldova (2008), trendi naraščanja temperature morja so opisani v začetni presoji morskih voda za načrt upravljanja z morskim okoljem iz leta 2012 in Načrtu upravljanja

z morskim okoljem iz 2017. Zaznan je bil naraščajoč trend v obdobju 1981–1999 v višini 1°C na desetletje (IzVRS 2012) in tudi naraščajoč trend obdobja 1957–2011 (MOP 2017).

Rast temperature morja potrjujejo tudi raziskave širšega območja. Segrevanje v Sredozemskem morju in tudi Jadranskem morju kažejo analize trendov površinskega sloja vode 1982–2012 (Shaltout in Omstedt 2014), potrjuje pa jih Šamanič do leta 2013 (Šamanič 2018, 28). Analiza temperature morja 1982–2016 kaže, da se Jadransko morje poleti najbolj segreva med vsemi morji v Sredozemlju, potrjuje pa tudi trend segrevanja celotnega Sredozemskega morja (Pastor, Valiente in Palau 2018). Raziskava trenda med letoma 1982 in 2018 kaže na segrevanje celotnega Sredozemskega morja v višini $0,041^{\circ}\text{C}$ na leto, Jadrana pa $0,045^{\circ}\text{C}$ letno (Pisano s sodelavci 2020). Naraščajoči trendi temperature površinskega sloja vode so redno analizirani na portalu SST CEAMed v okviru projektov VERSUS in IMAGINA-PROMETEO (SST CEAMed 2021). Za Sredozemsko morje so bile izvedene tudi napovedi segrevanja površinskega sloja morja, ki so ocenile segretje vode med $1,5$ in $3,1^{\circ}\text{C}$ do leta 2100 (Shaltout in Omstedt 2014: po Somot s sodelavci 2006 ter Parry s sodelavci 2007). Shaltout in Omstedt za Jadransko morje predvideva letni trend dviganja za $0,038^{\circ}\text{C}$ do leta 2100, sezonsko največje segrevanje pa pričakuje spomladi ($0,048^{\circ}\text{C}$) in poleti ($0,030^{\circ}\text{C}$).

Temperatura **podzemne vode** (predvsem odprtih vodonosnikov) kaže podoben naraščajoč trend, kar tudi povezujejo s segrevanjem temperature zraka (Menberg s sodelavci 2014). To poleg domačih raziskav (Draksler s sodelavci 2017), potrjujejo tudi trendi temperature podzemne vode na 227 vodnjakih v Avstriji med letoma 1964–2013, s segrevanjem v povprečju od $0,4$ do $0,5^{\circ}\text{C}$ na 10 let (Benz s sodelavci 2018). Medsebojno povezanost temperature podzemne vode in zraka potrjuje tudi analiza trendov temperature podzemnih voda na Bavarskem (Hemmerle in Bayer 2020), kjer opažajo povezanost in večjo odvisnost temperature vode na manjših globinah. Na Bavarskem je bilo ugotovljeno segrevanje podzemne vode med letoma 2000 in 2015 za $0,1$ – $0,4^{\circ}\text{C}$ na desetletje (Riedel 2019; Hemmerle in Bayer 2020).

Prispevek na podlagi povezanosti merjenih temperatur vode in zraka ter s pomočjo modelskih temperatur zraka po podnebnih scenarijih ocenjuje vpliv podnebnih sprememb na temperaturo vode površinskih in podzemnih voda ter morja v Sloveniji do konca 21. stoletja. Rezultate raziskave smo primerjali s spremembami temperatur vode v sosednjih pokrajinah.

2 Metode

Vpliv podnebnih sprememb na temperaturo vode smo ocenili prek povezanosti temperature vode s temperaturo zraka. Za opredelitev povezanosti smo uporabili regresijske modele na merjenih podatkih meteoroloških in hidroloških postaj, izdelan regresijski model za posamezno lokacijo pa je bil uporabljen za napoved temperature vode v odvisnosti od temperature zraka po podnebnih scenarijih.

Povezanost temperature zraka in vode ter možnost napovedovanja temperature vode na podlagi temperature zraka sta predmet raziskav od 60. let 20. stoletja (na primer McCombie 1959; Edinger, Duttweiler in Geyer 1968; Webb 1974; Shuter, Schlesinger in Zimmerman 1983; Livingstone in Lotter 1998). Povezanost temperature zraka je bila ugotovljena tako za površinske vode (vodotoki, jezera, morje) kot tudi za plitvejši del podzemnih voda, tj. do globine okrog 100 m (Benz s sodelavci 2018; Riedel 2019; Hemmerle in Bayer 2020).

Pri analizah povezanosti temperature zraka in vode so uporabili različne metodološke pristope, zlasti temelječe na regresijskih povezavah. Temperaturo vode so tako napovedovali na podlagi regresijskih modelov na tedenski, mesečni in letni ravni, večinoma pa so uporabili linearni model ali nelinearni regresijski model (Stefan in Preud'homme 1993; Mohseni, Stefan in Erickson 1998; Erickson in Stefan 2000; Morrill, Bales in Conklin 2005; Punzet s sodelavci 2012; Arismendi s sodelavci 2014; Caldwell s sodelavci 2014). V študiji primerjave različnih metod (Rabi, Hadzima-Nyarko in Šperac 2015) je bilo dokazano, da je stohastični model boljši od linearne regresije, vendar zahteva zvezne serije podatkov

o temperaturi vode z vsaj dnevnim časovnim korakom (Rabi, Hadzima-Nyarko in Šperac 2015: po Kothandaraman 1971 ter Cluis 1972). Najboljše rezultate po Rabijsvi da metoda večplastnih nevronske mreže (angleško *multilayer perception* – MLP), ki pa omogoča opredelitve samo nelinearnih povezav. Tudi v novejših raziskavah izvedenih po svetu, v zelo različnih hidro-podnebnih pogojih (od nižinskih rek do gorskih predelov v zmerno toplem pasu od ZDA, Evrope do Kitajske) v zadnjih 30 letih je bila potrjena dobra korelacija med zrakom in vodo ter da ima temperatura zraka prevladujoč vpliv na temperaturo vode. Obenem poudarjamo, da je drugi najpomembnejši dejavnik pretok (van Vliet s sodelavci 2011; Arsimendi s sodelavci 2014; Benz s sodelavci 2018; Islam s sodelavci 2019).

Rezultati analiz ocenjevanja vpliva podnebnih sprememb na temperaturo vode dobljenih z različnimi metodami kažejo na visoko povezanost med temperaturo zraka in temperaturo vode. Pri tem ne gre za neposreden vpliv temperature zraka na temperaturo vode, temveč za njuno visoko korelacijo, ki pa je posledica kompleksnih procesov izmenjave energije med zrakom in vodo. Korelacija je bila mnogokrat potrjena na podlagi merjenih vrednosti obeh količin, regresijski modeli pa so zadovoljivo napovedali temperaturo vode tudi za daljša časovna obdobja. Zato se regresijski modeli, v katerih se razmerje med temperaturo zraka in temperaturo vode ohranja tudi v prihodnjih obdobjih, uporabljajo pri ocenjevanju prihodnjih sprememb (Punzet s sodelavci 2012; Caldwell s sodelavci 2014). Arismendi s sodelavci (2014) predpostavlja podobno ohranjanje povezave v različnih časovnih obdobjih, hkrati pa ugotavljajo, da so v njihovi raziskavi regresijski modeli, umerjeni na enem obdobju, dali slabše rezultate na drugem časovnem obdobju, kar so pripisali različnim lokalnim geografskim ter podnebnim značilnostim in dejavnikom.

Punzet s sodelavci (2012) izpostavlja, da globalni podnebni modeli najbolje simulirajo temperaturo zraka, zato je za oceno prihodnje temperature vode pogosta uporaba regresijskih modelov, kjer je temperatura zraka ključni vhodni parameter.

V Sloveniji je bila ugotovljena pomembna povezava temperature morja in zraka (mareografska postaja v Kopru ter meteorološka postaja v Portorožu) ter rek Ljubljane v Mostah, Savinje v Nazarjah in Laškem ter Krke pri Podbočju s temperaturami zraka na najbližjih meteoroloških postajah. Na Savi pri Mednem je bila korelacija potrjena z modelsko metodo linearne odvisnosti za obdobje petih let 1996–2000 (Vodenik, Robič in Kobold 2008). Analiza povezanosti temperature Drave in temperatur zraka na Hrvaškem (s postajami Botovo–Koprivnica, Terezino Polje–Virovitica, Donji Miholjac–Donji Miholjac in Osijek–Osijek) z več metodami je pokazala, da je linearni regresijski model sicer slabši od stohastičnega, vendar je metodološko in izvedbeno preprostejši ter hkrati statistično zelo zanesljiv (Rabi, Hadzima-Nyarko in Šperac 2015).

2.1 Od meritev temperature zraka in vode, prek regresijskih modelov do projekcij do konca 21. stoletja

V raziskavi smo povezanost med podatkovnimi nizi temperature zraka in vode preverili na homogeniziranih mesečnih merjenih podatkih meteoroloških in vodomernih postaj. Začetni nabor je zajemal 66 vodomernih postaj, od teh 47 postaj na površinskih vodah, 18 na podzemnih vodah ter 1 postajo na morju. Med analizo smo zaradi neustreznih regresijskih modelov izločili 9 postaj na podzemnih vodah, tako je končni seznam analiziranih vodomernih postaj zajemal 57 vodomernih postaj, od tega 47 postaj na površinskih vodah, 9 postaj na podzemnih vodah in 1 postajo na morju (preglednica 1).

Izbrana metoda za projekcijo temperature vode je temeljila na kakovosti regresijskega modela. Kjer je bilo mogoče, smo uporabili nelinearni regresijski model, sicer pa linearni regresijski model, ki je dovolj kvalitetno opisal povezanost med temperaturo zraka in temperaturo vode na izbrani lokaciji.

Na podlagi preverjene korelacije med temperaturo zraka in vode je bila opravljena projekcija temperature vode od 2011 do 2100 na podlagi predvidene spremembe temperature zraka po izbranih podnebnih scenarijih za površinske (reke, jezera, morje) in podzemne vode v Sloveniji. Simulirali smo

Preglednica 1: Izbrani pari vodometnih in meteoroloških postaj z uporabljenimi regresijskimi modeli za oceno temperatur vode do konca 21. stoletja.

podsystem			vodomerna postaja				meteorološka postaja				regresijski model	
šifra	ime postaje	območje ali vodotok	nadmorska višina (m)	makroregija (Perko 1998)	mezoregija (Perko 1998)	porečje (Plut 1999)	šifra	ime	nadmo- rska višina (m)	izbrani regresijski model	izbrani meseci	
1015	Rankovci (3370)	Prek-mursko polje	198	panonski svet	Murska ravan	levi del porečja Mure	334	Gornja Radgona I	232	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
1040	Lipovci (2270)	Prek-mursko polje	181	panonski svet	Murska ravan	levi del porečja Mure	334	Gornja Radgona I	232	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
1045	Renkovci (0850)	Prek-mursko polje	174	panonski svet	Murska ravan	levi del porečja Mure	334	Gornja Radgona I	232	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
1090	Gornji Lakoš	Prek-mursko polje	161	panonski svet	Murska ravan	levi del porečja Mure	349	Podgradje	272	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
5030	Ključarovci (0540)	Mursko polje	181	panonski svet	Murska ravan	desni del porečja Mure	349	Podgradje	272	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
5050	Zgornje Krapje (0400)	Mursko polje	178	panonski svet	Murska ravan	desni del porečja Mure	349	Podgradje	272	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
50005	Žadovinek (NE-0177)	Krško polje	158	panonski svet	Krška ravan	spodnje porečje Save	234	Gornji Lenart	150	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
90030	Brezovica (0390)	Ljubljansko barje	296	dinarski svet	Ljubljansko barje	spodnje porečje Ljubljanice	203	Lipoglav	524	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
90055	Črna vas (1270)	Ljubljansko barje	289	dinarski svet	Ljubljansko barje	spodnje porečje Ljubljanice	203	Lipoglav	524	linearni (dvodelni)	februar–avgust in september–januar	
1060	Gornja Radgona I	Mura	202	panonski svet	Murska ravan	desni del porečja Mure	334	Gornja Radgona I	232	nelinearni sigmoidalni	januar–december	
1140	Pristava I	Ščavnica	169	panonski svet	Murska ravan	desni del porečja Mure	349	Podgradje	272	nelinearni sigmoidalni	januar–december	
1220	Polana I	Ledava	191	panonski svet	Murska ravan	levi del porečja Mure	355	Murska Sobota – Rakičan	187	nelinearni sigmoidalni	januar–december	

podzemne vode

površinske vode

2390	Otiški Vrh I	Mislinja	345	alpski svet	Strojna, Kozjak in Pohorje	zgornje Podravje z Mislinjo in Mežo	287	Ravne na Koroškem	440	nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
2650	Videm I	Dravinja	210	panonski svet	Dravska ravan	spodnje Podravje	309	Starše	240	nelinearni sigmoidalni	januar–december
2900	Zamušani I	Pesnica	202	panonski svet	Dravska ravan	spodnje Podravje	349	Podgradje	272	nelinearni sigmoidalni	januar–december
3280	Sveti Duh	Bohinjsko jezero	526	alpski svet	Julijske Alpe	porečje Save Dolinke in Save Bohinjke	403	Lesce	515	nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
3350	Mlino	Blejsko jezero	476	alpski svet	Savska ravan	porečje Save Dolinke in Save Bohinjke	403	Lesce	515	nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
3400	Mlino I	Jezernica	468	alpski svet	Savska ravan	porečje Save Dolinke in Save Bohinjke	403	Lesce	515	nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
3420	Radovljica I	Sava	408	alpski svet	Savska ravan	porečje Save Dolinke in Save Bohinjke	403	Lesce	515	nelinearni sigmoidalni	januar–december
3570	Šentjakob	Sava	268	alpski svet	Savska ravan	porečja Ljubljana- sko-litijske Save	203	Lipoglav	524	nelinearni sigmoidalni	januar–december
3650	Litija I	Sava	230	alpski svet	Posavsko hribovje	porečja Ljubljana- sko-litijske Save	214	Klenik pri Vačah	495	nelinearni sigmoidalni	januar–december
3740	Radeče	Sava	184	alpski svet	Posavsko hribovje	porečja zasavskih pritokov Save	214	Klenik pri Vačah	495	nelinearni sigmoidalni	januar–december
3850	Čatež I	Sava	137	panonski svet	Krška ravan	spodnje porečje Save	234	Gornji Lenart	150	nelinearni sigmoidalni	januar–december
4200	Suha I	Sora	329	alpski svet	Savska ravan	porečje Sore	8	Letališče Ljubljana, Brnik	364	nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
4400	Kammik I	Kamniška Bistrica	371	alpski svet	Savska ravan	Porečje Kamniške Bistrice	8	Letališče Ljubljana, Brnik	364	linearni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december

površinske vode

površinske vode												
vodomerna postaja						meteorološka postaja			regresijski model			
podsystem	šifra	ime postaje	območje ali vodotok	nadmorska višina (m)	makroregija (Perko 1998)	mezoregija (Perko 1998)	porečje (Plut 1999)	šifra	ime	nadmorska višina (m)	izbrani regresijski model	izbrani meseci
	4850	Radenci II	Kolpa	175	dinarski svet	Mala gora, Kočevski rog del porečja in Poljanska gora	belokranjski	257	Črnomelj – Dobliče	157	linearni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
	4860	Metlika	Kolpa	127	dinarski svet	Bela krajina	belokranjski del porečja Kolpe	432	Metlika	153	nelinearni sigmoidalni	januar–december
	4970	Gradac	Lahinja	129	dinarski svet	Bela krajina	belokranjski del porečja Kolpe	432	Metlika	153	nelinearni sigmoidalni	januar–december
	5030	Vrhnika	Ljubljana	286	dinarski svet	Ljubljansko barje	spodnje porečje Ljubljanice	197	Vrhnika	293	linearni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
	5080	Moste	Ljubljana	281	alpski svet	Savska ravan	spodnje porečje Ljubljanice	203	Lipoglav	524	nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
	5240	Verd I	Ljubija	286	dinarski svet	Ljubljansko barje	spodnje porečje Ljubljanice	197	Vrhnika	293	linearni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
	5770	Cerknica I	Cerknišča	559	dinarski svet	Notranjsko podolje	zgornje porečje Ljubljanice	136	Postojna	533	nelinearni sigmoidalni	januar–december
	5820	Postojnska jama	Pivka	511	dinarski svet	Pivško podolje in Vremščica	zgornje porečje Ljubljanice	136	Postojna	533	nelinearni sigmoidalni	januar–december
	5880	Hasberg	Unica	445	dinarski svet	Notranjsko podolje	zgornje porečje Ljubljanice	136	Postojna	533	nelinearni sigmoidalni	januar–december
	6020	Solčava I	Savinja	636	alpski svet	Kamniško-Savinjske Alpe	zgornje porečje274 Savinje s Pako	274	Mozirje	340	linearni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december
	6060	Nazarje	Savinja	337	alpski svet	Kamniško-Savinjske Alpe	zgornje porečje Savinje s Pako	274	Mozirje	340	nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december

površinske vode

6140	Celje II – brv	Savinja	230	alpski svet	Savinjska ravan	srednje porečje Savinje	274	Mozirje	340	nelinearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
6200	Laško I	Savinja	215	alpski svet	Posavsko hribovje	spodnje porečje214 Savinje	214	Klenik pri Vačah	495	nelinearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
6210	Veliko Širje I	Savinja	189	alpski svet	Posavsko hribovje	spodnje porečje214 Savinje	214	Klenik pri Vačah	495	nelinearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
6220	Luče	Lučnica	510	alpski svet	Kamniško-Savinjske Alpe	zgornje porečje Savinje s Pako	274	Mozirje	340	nelinearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
6240	Kraše	Dreta	366	alpski svet	Kamniško-Savinjske Alpe	zgornje porečje Savinje s Pako	274	Mozirje	340	nelinearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
6340	Rečica	Paka	305	alpski svet	Savinjska ravan	zgornje porečje Savinje s Pako	274	Mozirje	340	nelinearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
6550	Dolenja vas II	Bolska	268	alpski svet	Savinjska ravan	srednje porečje Savinje	274	Mozirje	340	nelinearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
7160	Podbočje	Krka	146	panonski svet	Krška ravan	spodnje porečje Krke	234	Gornji Lenart	150	nelinearni januar–december sigmoidalni
7340	Prečna	Prečna	164	dinarski svet	Novomeška pokrajina	spodnje porečje Krke	249	Novo mesto	220	linearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
8060	Log Čezsoški	Soča	340	alpski svet	Julijske Alpe	zgornje Posočje	58	Bovec	452	linearni sigmoidalni januar–julij in avgust–december (dvodelni)
8180	Solkan I	Soča	54	sredozemski svet	Vipavska dolina	srednje Posočje z Vipavo	96	Nova Gorica	113	nelinearni januar–december sigmoidalni
8350	Podroteja I	Idrija	327	dinarski svet	Idrijsko hribovje	porečje Idrijce	197	Vrhnika	293	linearni januar–december
8450	Hotešk	Idrija	161	dinarski svet	Idrijsko hribovje	porečje Idrijce	96	Nova Gorica	113	nelinearni januar–december sigmoidalni

podsystem		vodomerna postaja					meteorološka postaja			regresijski model	
šifra	ime postaje	območje ali vodotok	nadmorska višina (m)	makroregija (Perko 1998)	mezoregija (Perko 1998)	porečje (Plut 1999)	šifra	ime	nadmo- rska višina (m)	izbrani regresijski model	izbrani meseci
8500	Bača pri Modreju	Bača	164	dinarski svet	Idrijsko hribovje	porečje Idrijce	96	Nova Gorica	113	nelinearni sigmoidalni	januar–december
8560	Vipava I	Vipava	96	sredozemski svet	Vipavska dolina	srednje Posočje z Vipavo	97	Bilje	55	linearni	januar–december
8590	Dornberk	Vipava	54	sredozemski svet	Vipavska dolina	srednje Posočje z Vipavo	97	Bilje	55	linearni	januar–december
8600	Miren	Vipava	37	sredozemski svet	Vipavska dolina	srednje Posočje z Vipavo	97	Bilje	55	nelinearni sigmoidalni	januar–december
8630	Ajdovščina I	Hubelj	107	sredozemski svet	Vipavska dolina	srednje Posočje z Vipavo	97	Bilje	55	linearni	januar–december
9030	Trnovo	Reka	393	sredozemski svet	Brkini in dolina Reke	porečje Reke	136	Postojna	533	nelinearni sigmoidalni	januar–december
9050	Cerkvenikov mlin	Reka	343	sredozemski svet	Brkini in dolina Reke	porečje Reke	136	Postojna	533	nelinearni sigmoidalni	januar–december
9350	Koper – kapitanija	Jadransko morje	0	sredozemski svet	Tržaški zaliv		464	Portorož – 2 Letališče		nelinearni sigmoidalni (dvodelni)	januar–julij in avgust–december

tri scenarije izpustov toplogrednih plinov: RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5, poljudneje poimenovani kot optimistični, zmerno optimistični ter pesimistični scenarij – glede na njihov vpliv na družbo (Bertalančič s sodelavci 2018). Podnebni scenariji predstavljajo predvidene koncentracije toplogrednih plinov ob različnih predpostavkah razvoja in ukrepov družbe (van Vuuren s sodelavci 2011). Rezultati simulacij po podnebnih scenarijih prikazujejo oceno treh glavnih potekov sprememb temperature vode v Sloveniji zaradi pričakovanih podnebnih sprememb do konca 21. stoletja.

Naslednja poglavja podrobneje opisujejo postopek izbora vodomernih in meteoroloških postaj, pravo regresijskih modelov, izvedbo simulacij temperatur vode v prihodnosti in metodologijo analize rezultatov.

2.2 Homogenizacija, povezanost temperature zraka in vode ter regresijski modeli

V analizo povezanosti smo vključili vse vodomerne postaje s homogeniziranim podatkovnim nizom povprečne mesečne temperature vode. Postaje s homogeniziranim nizom podatkov so preverjene in imajo daljše podatkovne nize. Homogenizacija je bila izvedena predhodno (Draksler 2016; Draksler s sodelavci 2017; Draksler, Frantar in Savič 2018; Bertalančič s sodelavci 2018), izbor postaj zanj pa je temeljil na naslednjih kriterijih:

- najmanj 20 let meritev temperature vode (zaporedni niz meritev ni potreben);
- popolni letni nizi za 20-letno obdobje;
- homogenizacija se izvede na podlagi medsebojnih primerjav vodomernih postaj; postopek zahteva dobro ujemanje obsega podatkovnih nizov s pogojem, da ima na začetno leto podatke vsaj pet postaj;
- za površinske vode in morje smo izbrali obdobje 1953–2015;
- za podzemne vode smo izbrali obdobje 1969–2015.

S homogenizacijo smo pridobili popravljene in dopolnjene podatkovne nize za celotno časovno obdobje, torej od leta 1953 za površinske vode oziroma leta 1969 za podzemne vode do leta 2015. Homogenizacija temperature zraka je bila izvedena po enakem postopku leta 2015 (Vertačnik, Vičar in Bertalančič 2015), homogenizirani nizi povprečne mesečne temperature zraka pa zajemajo obdobje 1956–2011.

Vodomerne postaje na površinskih vodah so razporejene po celotnem ozemlju in porečjih Slovenije: so v vseh petih glavnih porečjih (Save, Kolpe, Drave, Mure, Soče, porečjih drugih jadranskih rek) ter v 19 od 26 podporečjih po Plutovi (1999) členitvi. Izbranih vodomernih postaj na površinskih vodah je 47. Vodomerne postaje imajo povprečno 1305 km² veliko zaledje (ARSO 2021).

Postaje na podzemnih vodah so na treh sklenjenih območjih: Prekmurskem in Murskem polju, Brežiškem in Krškem polju ter na Ljubljanskem barju, saj se je temperatura na podzemnih vodah v preteklosti praviloma merila le na lokacijah z majhnimi globinami do podzemne vode (do približno 10 m). Številne postaje na podzemnih vodah imajo prekratek ali nepopoln niz meritev za izvedbo homogenizacije.

Vodomerne postaje na morju je v Kopru.

Za boljšo reprezentativnost primerjalnih meteoroloških postaj smo za nadaljnjo analizo izbrali postaje, ki so čim bližje vodomernim postajam, ležijo na podobni nadmorski višini in imajo podobne podnebne značilnosti, kot obravnavane vodomerne postaje.

Napovedi temperature vode smo, sorodno z drugimi raziskavami (Mohseni, Stefan in Erickson 1998; Vodenik, Robič in Kobold 2008; Punzet s sodelavci 2012; Arismendi s sodelavci 2014; Caldwell s sodelavci 2014), izvedli na podlagi linearnih ali nelinearnih regresijskih modelov, ki sicer slabše napovedujejo ekstremne vrednosti temperature vode, vendar je pri uporabljenih mesečnih povprečjih razpon znatno manjši. Odvisnost temperature vode od temperature zraka smo najprej opisali s sigmoidalno funkcijo:

$$T_v = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{(\beta - T_z)}}$$

kjer je T_v ocenjena temperatura vode, T_z temperatura zraka, koeficient α predstavlja ocenjeno maksimalno temperaturo vode, koeficient γ je ocena največjega naklona funkcije (naravna širina prehoda), μ pa predstavlja temperaturo zraka pri točki prevoja funkcije. Koeficient μ označuje minimalno temperaturo vode s privzeto vrednostjo 0°C (Mohseni, Stefan in Erickson 1998; Vodenik, Robič in Kobold 2008).

Na istih podatkovnih nizih smo uporabili še linearni regresijski model z regresijskim koeficientom b ter konstanto a :

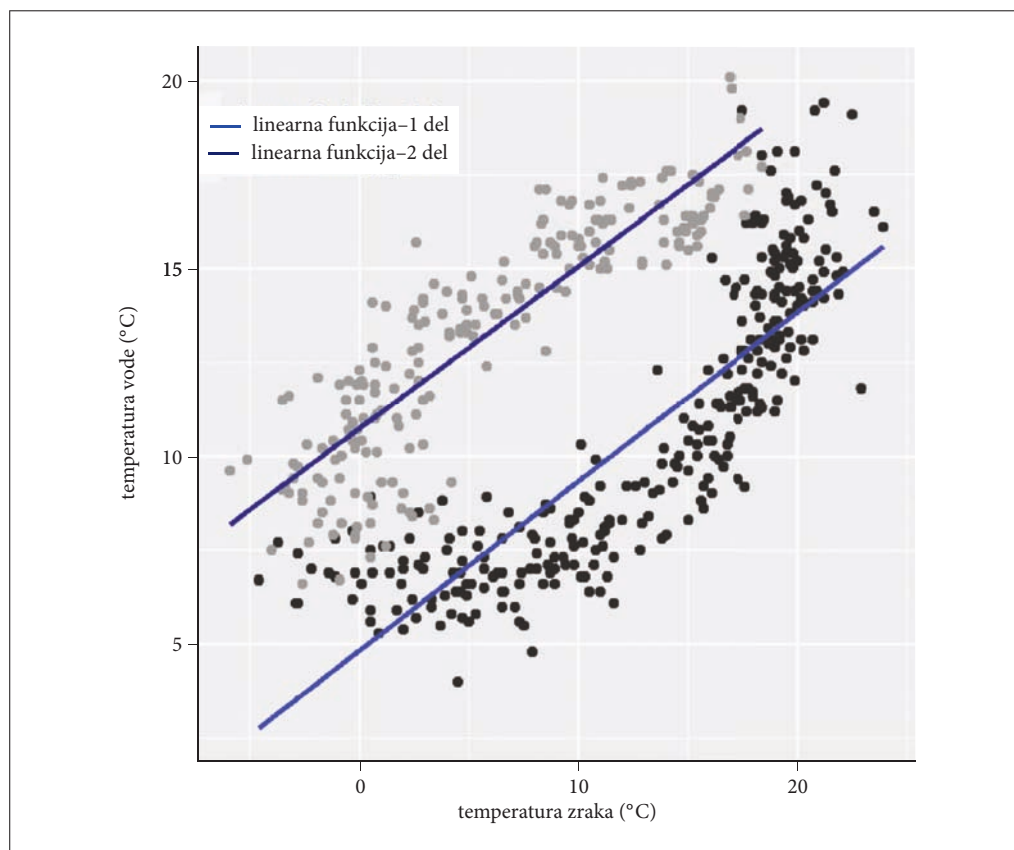
$$T_v = b \times T_z + a.$$

Povezanost temperature zraka in temperature vode smo zaradi časovnega ujemanja nizov (podatkovni nizi za temperaturo zraka so homogenizirani od leta 1956 naprej) ocenili za dve obdobji:

- 1956–2011 za površinske vode in morje,
- 1969–2011 za podzemne vode.

Več vodomernih postaj ima izrazit časovni zamik temperature vode v odzivu na temperaturo zraka v drugi polovici leta (slika 1), zato smo za opis razmerja med temperaturo zraka in temperaturo vode uporabili tudi dvodelne regresijske modele.

Kakovost regresijskih modelov smo ocenili z dvema testoma: Nash-Sutcliffe koeficientom (angleško *Nash-Sutcliffe Coefficient* – NSC) in testom RMSE (*Root Mean Square Error* – kvadratni koren



Slika 1: Časovni zamik (histereza) temperature vode v odzivu na temperaturo zraka v drugi polovici leta. Črne pike označujejo obdobje februar–avgust, sive pike pa obdobje september–januar.

povprečja kvadratov napake) ter izbrali modele z najboljšimi rezultati (preglednica 2). Pri preverjanju kakovosti regresijskih modelov se je pokazalo, da za 9 od 18 vodomernih postaj podzemnih voda s homogeniziranim podatkovnim nizom noben model ni zadovoljivo opisal povezanosti med temperaturo vode in zraka. Teh 9 postaj, ki ležijo na Krško-Brežiškem polju, smo zato izločili iz nadaljnje analize.

Na podlagi testov NSC in RMSE smo za nadaljnje analize izbrali regresijski model, ki je na posamezni vodomerni postaji najbolje opisal povezanost temperature zraka in vode (preglednica 2):

- **enodelni nelinearni sigmoidalni regresijski model** na mesečnih podatkih smo uporabili za 22 postaj na površinskih vodah;
- **dvodelni nelinearni sigmoidalni regresijski model** na mesečnih podatkih smo uporabili za 14 vodomernih postaj površinskih voda (12 postaj na vodotokih in 2 postaji na jezerih) in 1 postaji na morju; prvi regresijski model je zajemal podatke od meseca januarja do julija, drugi regresijski model pa od avgusta do decembra;
- **enodelni linearni regresijski model** na mesečnih podatkih smo uporabili za 4 vodomerne postaje na površinskih vodah;
- **dvodelni linearni regresijski model** na mesečnih podatkih smo uporabili na 7 vodomernih postajah površinskih voda ter 9 vodomernih postajah na podzemnih vodah. Na površinskih vodah je prvi regresijski model zajemal podatke od meseca januarja do julija, drugi regresijski model pa od avgusta do decembra. Na podzemnih vodah smo za prvi del regresijskega modela uporabili podatke od meseca februarja do avgusta, za drugi del pa od meseca septembra do januarja.

2.3 Podnebni scenariji in modeli

Globalni podnebni scenariji Medvladnega foruma za podnebne spremembe (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) so bili predstavljeni leta 2013 (IPCC 2013) in so bili nato preslikani prek regionalnih podnebnih modelov na območje Slovenije. Predvidene spremembe podnebja so bile pripravljene na podlagi podatkov do leta 2010 (van Vuuren s sodelavci 2011; IPCC 2013; Bertalančič s sodelavci 2018; Hausfather 2019) in vključujejo štiri scenarije, ki temeljijo na razponu (dodatnega) sevalnega prispevka leta 2100, od 2,6 do 8,5 W/m² v primerjavi s predindustrijskim obdobjem (IPCC 2013; Hausfather 2019). Višja kot je predvidena dodatna sevalna energija, večje so predvidene spremembe podnebja. Za to analizo smo izbrali tri podnebne scenarije: RCP2.6 (optimističen), RCP4.5 (zmerno optimističen) in RCP8.5 (pesimističen). Modelske simulacije spremenjenih podnebnih dejavnikov v Sloveniji so bile izdelane na podlagi 14 kombinacij globalnega in regionalnega podnebnega modela, po šest za scenarija RCP4.5 in RCP8.5 in dva za scenarij RCP2.6. Regionalni podnebni modeli so bili izbrani na podlagi ujemanja z meritvami temperature zraka v obdobju 1981–2010 (Bertalančič s sodelavci 2018).

Preglednica 2: povprečne vrednosti NSC in RMSE pri izbranih regresijskih modelih.

	enodelni linearni regresijski model		enodelni nelinearni sigmoidalni model		dvodelni linearni regresijski model				dvodelni nelinearni sigmoidalni model			
	NSC	RMSE	NSC	RMSE	NSC-1	RMSE-1	NSC-2	RMSE-2	NSC-1	RMSE-1	NSC-2	RMSE-2
podzemne vode					0,676	1,360	0,669	1,264				
površinske vode	0,697	0,691	0,953	1,014	0,851	0,795	0,838	0,798	0,971	0,832	0,969	0,764
morje									0,970	1,030	0,976	0,759

Za izračun temperature vode do konca 21. stoletja smo uporabili povprečno temperaturo zraka posamezne kombinacije globalnega in regionalnega podnebnega modela. Iz rastrske mreže z modelskimi vrednostmi temperature zraka smo izbrali točko, ki ustreza lokaciji primerjalne meteorološke postaje in vrednost temperature zraka vstavili v pripravljene regresijske modele ter izračunali temperaturo vode do konca 21. stoletja za vseh 14 kombinacij podnebnih modelov. Izračunali smo mesečne temperature vode za vseh 57 vodomernih postaj, za nadaljnje analize pa smo mesečne nize združili v sezonska in letna povprečja.

2.4 Analiza ocenjenih temperatur vode

Analizo ocenjenih temperatur vode smo izvedli po 30-letnih obdobjih:

- 1981–2010 (referenčno, primerjalno obdobje);
- 2011–2040 (bližnja prihodnost);
- 2041–2070 (sredina stoletja);
- 2071–2100 (konec stoletja).

Obdobje 1981–2010 predstavlja referenčno obdobje in služi za primerjavo modelskih rezultatov temperatur vode v kasnejših projekcijskih obdobjih do konca 21. stoletja. Primerjali smo odklone temperature vode glede na referenčno obdobje, izračunali statistično zanesljivost sprememb po posameznih podnebnih modelih in nato na podlagi skladnosti modelskih rezultatov ocenili skupno zanesljivost spremembe temperature vode.

Za vsak model smo izračunali najmanjšo in največjo vrednost ter mediano vseh šestih modelov za vsako vodomerno postajo na obravnavanem območju ter tako dobili modelski razpon odklona za vsak podnebni scenarij.

Statistična zanesljivost sprememb je bila izračunana v treh korakih. S statističnim testom (*Mann-Whitney-Wilcox test*) smo za vsak model izračunali, ali je sprememba statistično značilna, nato pa smo na podlagi statističnih testov vseh modelov in predznaka spremembe (zmanjšanje ali povečanje) določili končno zanesljivost spremembe za vsakega od podnebnih scenarijev.

Opredelili smo tri vrste zanesljivosti. Kjer se večina modelov ujema v predznaku statistično značilne spremembe, kaže na »visoko stopnjo zanesljivosti« podnebnega scenarija. To pomeni, da so spremembe določene smeri ali velikosti pričakovane z veliko verjetnostjo. Kjer si modeli nasprotujejo glede smeri spremembe, smo končno zanesljivost označili kot »nizko stopnjo zanesljivosti«, ki kaže na pomembne razlike v podnebnih modelih, ki privedejo do nasprotujočih rezultatov. V takšnih primerih sklepamo, da je verjetnost spremembe v eno ali drugo smer velika. V primerih, kjer večina modelov kaže statistično neznačilne spremembe in sprememb glede na podatke ne pričakujemo, smo rezultate podnebnega scenarija označili s stopnjo zanesljivosti »ni spremembe«. Gre za majhne, statistično nepomembne spremembe, ki so znotraj naravne spremenljivosti. Opisana metodologija je skladna z metodologijo, uporabljeno v »Oceni podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja« (Bertalančič s sodelavci 2018).

Analizirali smo povprečne sezonske in letne vrednosti v tridesetletnih obdobjih. Poleg analize različnih časovnih agregatov smo izvedli tudi prostorsko analizo z obravnavo posameznih tipov voda (reke, jezera, podzemne vode in morje). Kot srednjo vrednost modelov posameznega scenarija smo v analizi uporabili mediano modelov.

3 Ocena sprememb temperature vode do konca 21. stoletja

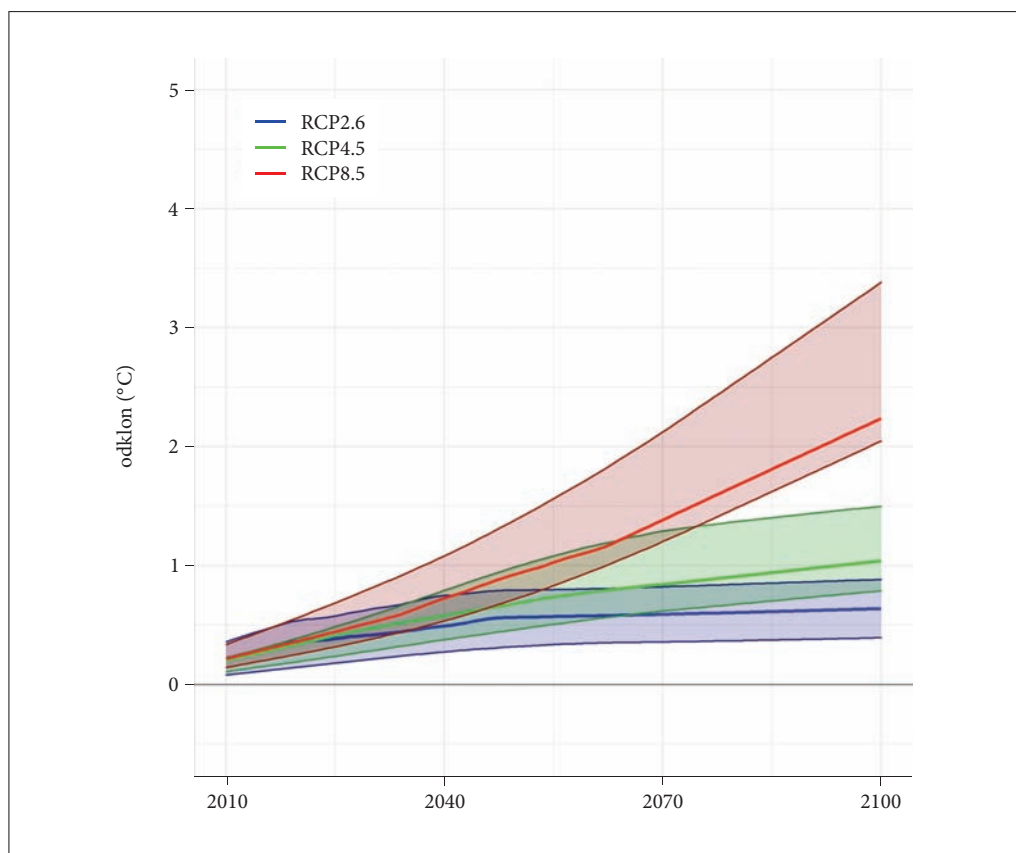
Analiza modelov podnebnih scenarijev kaže, da se bo temperatura vode do konca 21. stoletja dvignila v vseh podsistemih. Najbolj se bo segrelo morje, sledijo površinske vode, najmanjši porast povprečnih letnih temperatur vode pa pričakujemo pri podzemnih vodah. Podobno kaže sezonska analiza: v vseh

sezonah se bo najbolj dvignila temperatura morja, sledijo površinske ter podzemne vode. Na večje spremembe kaže poleti in jeseni, manjše pa pozimi in spomladi.

3.1 Površinske vode

Mediane temperature vode, izračunane po podnebnih modelih, kažejo, da se bo povprečna letna temperatura površinskih voda glede na primerjalno obdobje 1981–2010 do konca 21. stoletja (2071–2100) dvignila za $0,64^{\circ}\text{C}$ po optimističnem scenariju RCP2.6, za $0,95^{\circ}\text{C}$ po srednje optimističnem scenariju RCP4.5 in za $1,83^{\circ}\text{C}$ po pesimističnem scenariju RCP8.5 (slika 2, preglednica 3). Časovni potek odklonov kaže na hiter dvig povprečne letne temperature po scenariju RCP8.5, najbolj izrazito v zadnjem 30-letnem obdobju. Scenarija RCP4.5 in RCP2.6 kažeta podoben odklon temperature do sredine stoletja, nato se odklon temperature po scenariju RCP2.6 ustali na okrog $0,6^{\circ}\text{C}$ glede na primerjalno obdobje, po scenariju RCP4.5 pa se še naprej zmeroma dviguje do konca stoletja (slika 2).

Scenarij RCP8.5 na 36 od 47 vodomernih postaj predvideva do konca stoletja povišanje povprečne letne temperature površinske vode za več kot $1,5^{\circ}\text{C}$ (preglednica 4, slika 3). Po scenariju RCP4.5 so



Slika 2: Časovni potek spremembe povprečne letne temperature površinskih voda v Sloveniji do konca 21. stoletja za tri podnebne scenarije, z razponi odstopanj modelov. Srednje črte prikazujejo glajene mediane, ovojnice pa največjo in najmanjšo vrednost podnebnih modelov.

Preglednica 3: Razpon modelskih odklonov temperatur (°C) površinskih voda po podnebnih scenarijih v 30-letnih obdobjih glede na referenčno obdobje 1981–2010 (MIN – minimum, MED – mediana, MAX – maksimum).

scenarij	letni čas	2011–2040			2041–2070			2071–2100		
		MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
RCP2.6	pomlad	–0,01	0,43	0,87	0,25	0,52	0,79	0,29	0,6	0,92
	poletje	0,34	0,59	0,84	0,74	0,76	0,77	0,57	0,74	0,9
	jesen	0,11	0,55	0,99	0,46	0,75	1,04	0,3	0,67	1,04
	zima	0,10	0,28	0,46	0,15	0,39	0,63	0,32	0,61	0,90
	leto	0,12	0,46	0,79	0,41	0,60	0,80	0,36	0,64	0,93
RCP4.5	pomlad	0,13	0,28	0,59	0,40	0,64	1,11	0,64	0,86	1,34
	poletje	0,10	0,45	0,73	0,87	0,98	1,32	0,84	1,04	1,54
	jesen	0,17	0,55	0,71	0,43	0,69	1,33	0,78	0,96	1,65
	zima	0,26	0,32	0,58	0,40	0,54	1,23	0,47	0,81	1,34
	leto	0,22	0,43	0,53	0,58	0,74	1,22	0,77	0,95	1,41
RCP8.5	pomlad	0,26	0,42	0,64	0,73	0,93	1,56	1,40	1,69	2,63
	poletje	0,44	0,55	0,66	0,78	1,10	1,50	1,78	2,07	2,96
	jesen	0,26	0,50	1,05	0,94	1,21	1,78	1,66	2,08	3,14
	zima	0,14	0,28	0,64	0,52	0,79	1,24	1,43	1,68	2,50
	leto	0,34	0,44	0,73	0,83	0,96	1,51	1,62	1,83	2,80

Preglednica 4: Število vodomernih postaj na površinskih vodah po razredih odklonov povprečne letne temperature vode. Odkloni predstavljajo odklon od mediane modelskih rezultatov.

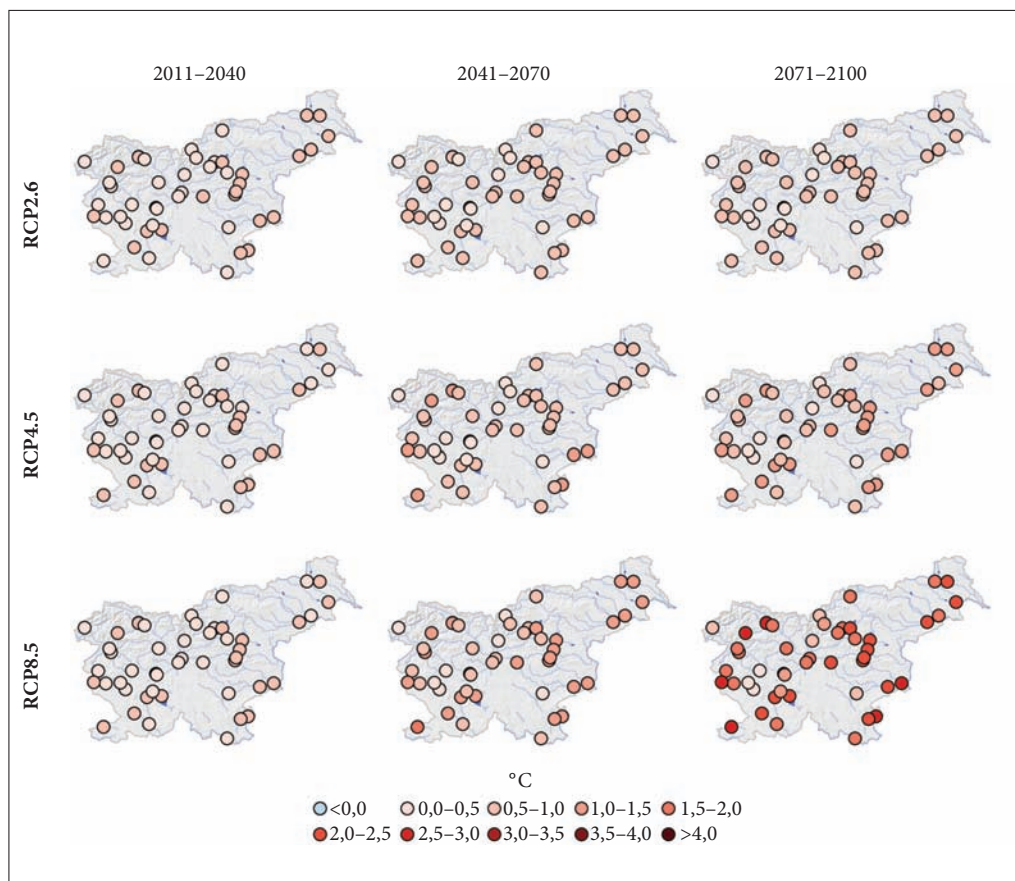
scenarij	obdobje	razredi odklonov (°C)					
		0,0–0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0
RCP2.6	2011–2040	25	22				
	2041–2070	12	35				
	2071–2100	11	36				
RCP4.5	2011–2040	29	18				
	2041–2070	11	29	7			
	2071–2100	8	18	21			
RCP8.5	2011–2040	26	21				
	2041–2070	8	16	21	2		
	2071–2100	3	5	3	16	12	8

na vseh postajah odkloni nižji od $1,5^{\circ}\text{C}$, po scenariju RCP2.6 pa nižji od 1°C . Sredi stoletja bo skoraj polovica postaj po scenariju RCP8.5 z odklonom nad 1°C , po scenariju RCP4.5 je takšnih postaj 7, po scenariju RCP2.6 pa nobene.

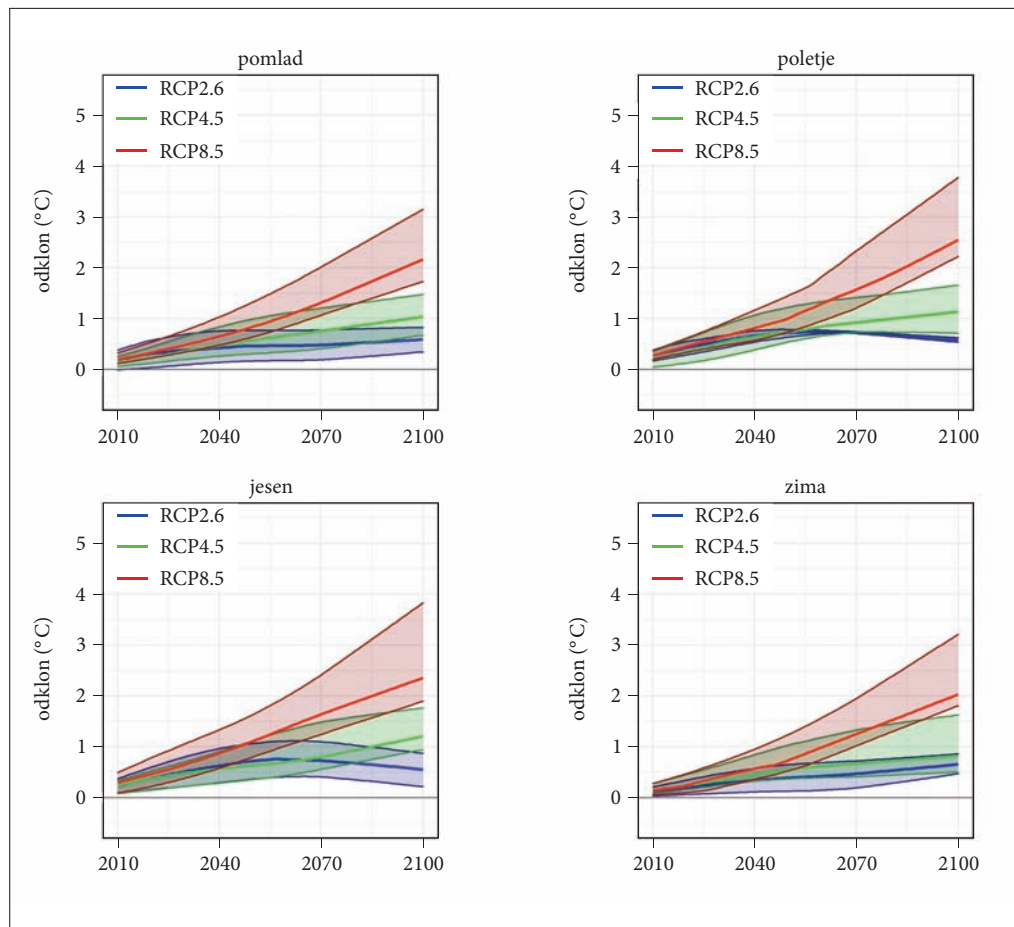
Analiza geografske razporeditve odklonov kaže na večje dvige temperature vode vodotokov v srednjem in spodnjem toku, nekoliko manjše spremembe pa na vodomernih postajah v povirjih in v bližini kraških izvirov (slika 3). Zvišanje povprečne letne temperature Blejskega in Bohinjskega jezera bo izrazitejše kot na rekah.

Sezonski pregled po scenariju RCP8.5 (preglednica 3, slika 4) kaže dvig poletne in jesenske temperature vode v zadnjem 30-letnem obdobju 2071–2100 za $2,1^{\circ}\text{C}$, zimske ter pomladne pa $1,7^{\circ}\text{C}$. Scenarij RCP4.5 kaže sezonski dvig temperatur za okrog 1°C (med $0,8^{\circ}\text{C}$ pozimi in $1,0^{\circ}\text{C}$ poleti) do konca stoletja, scenarij RCP2.6 pa zmernejši dvig sezonskih temperatur ($0,6$ – $0,7^{\circ}\text{C}$), pri tem pa se konec stoletja po optimističnem scenariju poleti ter jeseni lahko pričakuje zniževanje temperatur v primerjavi s sredino 21. stoletja.

Tudi sezonske spremembe bodo predvidoma manj izrazite na vodomernih postajah v povirnih delih in v bližini kraških izvirov (slika 5).

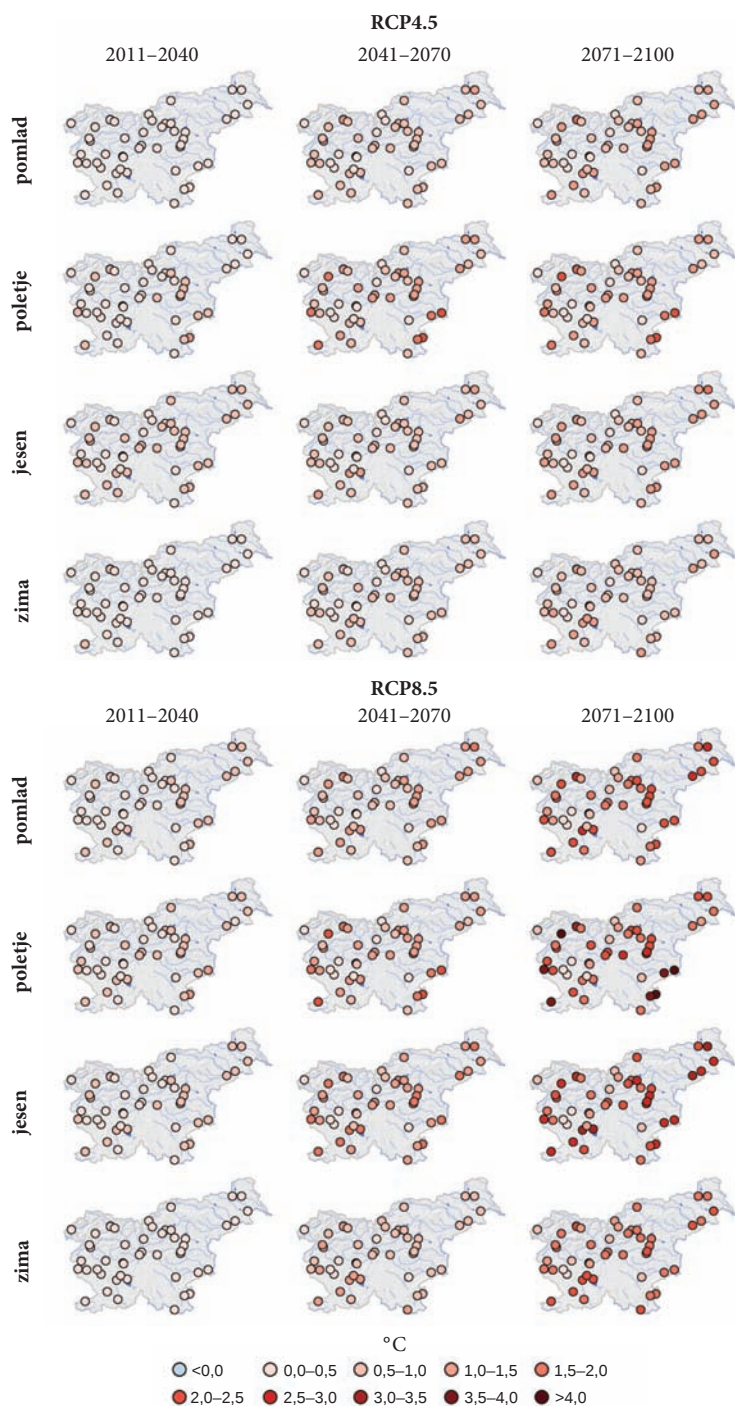


Slika 3: Geografska razporeditev odklonov povprečne letne temperature površinskih voda in morja glede na referenčno obdobje 1981–2010. Vrednosti odklonov predstavljajo mediane podnebni modelov za tri podnebne scenarije.



Slika 4: Časovni potek spremembe povprečne sezone temperature površinskih voda v Sloveniji do konca 21. stoletja za tri podnebne scenarije, z razponi odstopanj modelov. Srednje črte prikazujejo glajene mediane, ovojnice pa največjo in najmanjšo vrednost podnebnih modelov.

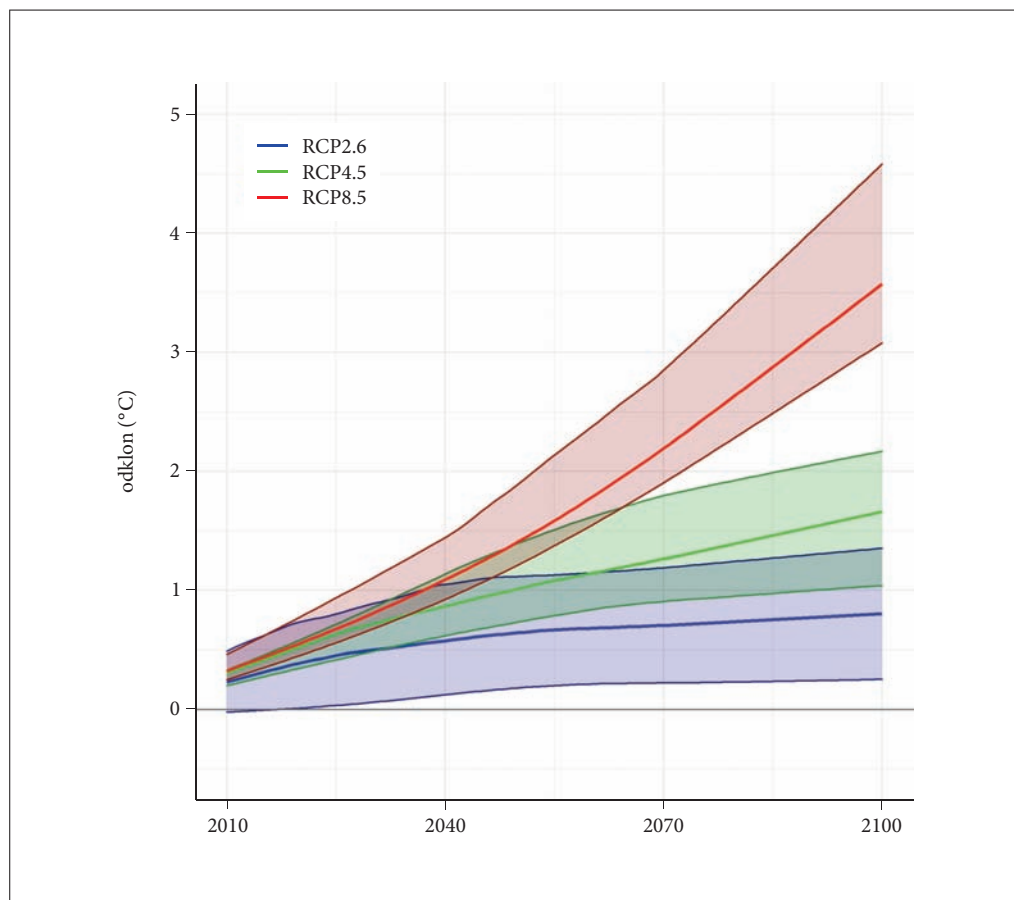
Slika 5: Geografska razporeditev odklonov sezonskih temperatur površinskih voda in morja glede na referenčno obdobje 1981–2010 za podnebna scenarija RCP4.5 in RCP8.5. Vrednosti odklonov predstavljajo mediane podnebnih modelov. ►



3.2 Morje

Analiza simulacij temperature morja kaže, da se bo povprečna letna temperatura morja do konca 21. stoletja zvišala po vseh treh scenarijih (slika 6, preglednica 5). Po scenariju RCP8.5 se do konca stoletja pričakuje porast temperature za več kot 3° C (povprečje obdobja 2071–2100: +2,9° C), po scenariju RCP4.5 za 1,5° C (povprečje 2071–2100: +1,4° C) in RCP2.6 pod 1° C (povprečje 2071–2100: +0,8° C).

Analiza sezonskih sprememb (preglednica 5, slika 7) kaže, da se bo po scenarijih RCP4.5 in RCP8.5 temperatura morja dvignila v vseh sezonah, pri čemer se po pesimističnem scenariju poleti ob koncu stoletja pričakuje dvig temperature za 3,8° C (mediana), v ostalih letnih časih pa med 2,4° C (pomlad, zima) in 2,8° C (jesen). Scenarij RCP4.5 kaže na zmernejšo rast temperatur, z največjimi odkloni poleti (+1,9° C), v ostalih sezonah pa med 1,1° C in 1,2° C. Scenarij RCP2.6 kaže na rast temperature vode pod 1° C, ob tem je poleti in jeseni predvidena rast temperatur do sredine stoletja, nato pa sledi zmerno znižanje.



Slika 6: Časovni potek spremembe povprečne letne temperature morja v Sloveniji do konca 21. stoletja za tri podnebne scenarije, z razponi odstopanj modelov. Srednje črte prikazujejo glajene mediane, ovojnice pa največjo in najmanjšo vrednost podnebnih modelov.

Preglednica 5: Razpon modelskih odklonov temperatur (°C) morja po podnebnih scenarijih v 30-letnih obdobjih glede na referenčno obdobje 1981–2010 (MIN – minimum, MED – mediana, MAX – maksimum).

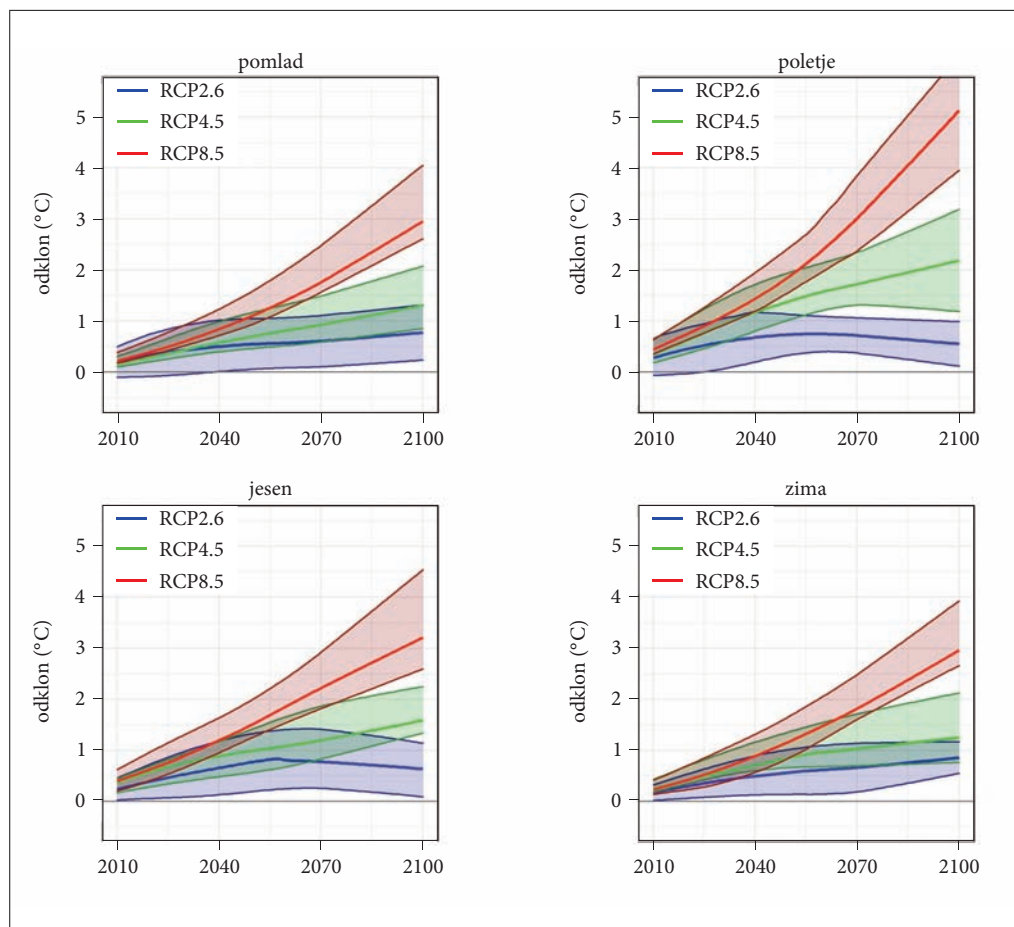
scenarij	letni čas	2011–2040			2041–2070			2071–2100		
		MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
RCP2.6	pomlad	–0,18	0,43	1,04	0,16	0,64	1,13	0,18	0,75	1,32
	poletje	–0,10	0,66	1,42	0,50	0,84	1,17	0,24	0,83	1,42
	jesen	–0,11	0,52	1,16	0,32	0,82	1,32	0,16	0,74	1,32
	zima	0,06	0,37	0,68	0,10	0,54	0,98	0,36	0,84	1,33
	leto	–0,10	0,49	1,07	0,26	0,70	1,15	0,22	0,77	1,32
RCP4.5	pomlad	0,23	0,31	0,78	0,60	0,84	1,36	0,90	1,08	1,79
	poletje	0,42	0,78	1,28	1,52	1,73	2,16	1,40	1,85	2,64
	jesen	0,32	0,77	0,90	0,64	1,02	1,67	1,20	1,33	2,07
	zima	0,42	0,54	0,90	0,70	0,83	1,53	0,78	1,23	1,92
	leto	0,41	0,66	0,80	0,91	1,15	1,65	1,15	1,42	1,99
RCP8.5	pomlad	0,33	0,55	0,78	1,12	1,28	1,87	2,07	2,38	3,37
	poletje	0,79	0,96	1,03	1,57	2,20	2,65	3,21	3,84	5,00
	jesen	0,47	0,66	1,31	1,39	1,71	2,17	2,28	2,79	3,75
	zima	0,21	0,45	0,89	0,86	1,28	1,70	2,21	2,42	3,28
	leto	0,55	0,67	0,96	1,39	1,55	2,01	2,48	2,91	3,81

3.3 Podzemne vode

Za omejeno število analiziranih postaj na podzemnih vodah je več razlogov: težja izvedbe meritev temperature vode v preteklosti in posledično krajši ter neustrezni nizi z mnogo manjkajočimi podatki, zato smo številne postaje na ostalih vodonosnikih izključili že pred homogenizacijo (Draksler 2016; Draksler s sodelavci 2017). Od 18 vodomernih postaj s homogeniziranim nizom je po izračunu korelacije s temperaturo zraka in pregledu ustreznosti za modelsko napoved, pogoje izpolnjevalo 9 vodomernih postaj (preglednica 1) na predhodno omenjenih treh območjih.

Povprečna letna temperatura vode na izbranih postajah podzemnih voda se bo zvišala (preglednica 6, slika 8), vendar bodo spremembe manjše kot na površinskih vodah in morju. Največje zvišanje kaže podnebni scenarij RCP8.5, kjer mediane modelov kažejo na dvig za 1,1°C v obdobju 2071–2100. Do prve polovice stoletja se povprečna temperatura po pesimističnem scenariju dvigne za dobre pol stopinje Celzija, v drugi polovici sledi hitrejša naraščanje vse do konca stoletja. Podnebna scenarija RCP4.5 in RCP2.6 kažeta na manjše spremembe povprečne letne temperature podzemnih voda. Do sredine 21. stoletja (2071–2070) se po obeh scenarijih temperatura zviša za 0,4°C. Po optimističnem scenariju RCP2.6 se do konca stoletja (2071–2100) tak odklon ohranja, po scenariju RCP4.5 temperatura naraste za 0,6°C glede na primerjalno obdobje.

Modelske rezultati scenarija RCP8.5 v zadnjem projekcijskem obdobju (2071–2100) kažejo, da je na 5 od 9 vodomernih postaj ocenjeni odklon temperature vode večji od 1°C (preglednica 7, slika 9). Po rezultatih scenarija RCP4.5 so v istem obdobju odkloni na 5 postajah med 0,5 in 1°C, po scenariju RCP2.6 pa so takšne štiri postaje.

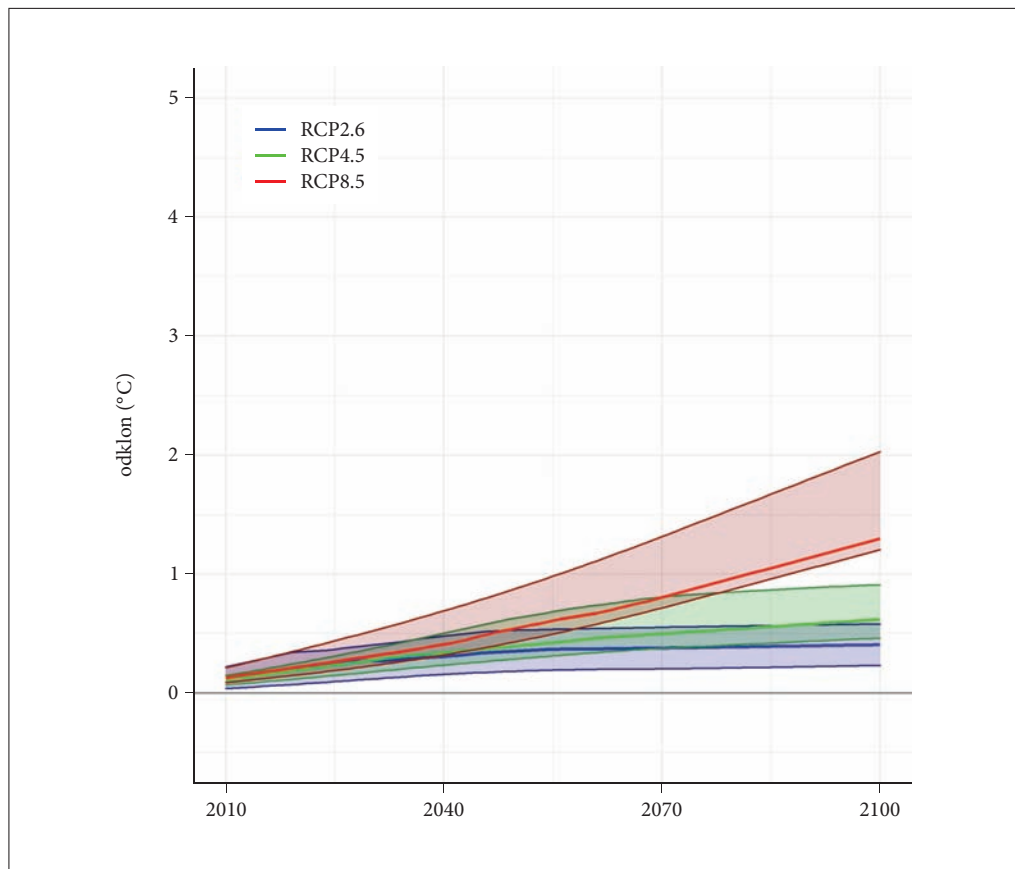


Slika 7: Časovni potek spremembe sezonskih temperatur morja v Sloveniji do konca 21. stoletja za tri podnebne scenarije, z razponi odstopanj modelov. Srednje črte prikazujejo glajene mediane, ovojnice pa največjo in najmanjšo vrednost podnebnih modelov.

Sezonski pregled (preglednica 6, slika 10) izkazuje po scenariju RCP8.5 večje spremembe temperatur pozimi ter jeseni, kjer je pričakovan dvig do konca 21. stoletja za 1,3 oziroma 1,2° C. Dvig povprečnih pomladanskih temperatur podzemne vode je nižji, in sicer ocenjen pod 1° C. Pri scenariju RCP4.5 so odkloni med sezonami med +0,4° C spomladi in +0,7° C pozimi, poleti ter jeseni pa mediane modelov kažejo na 0,5° C višje temperature vode glede na primerjalno obdobje. Po scenariju RCP2.6 so spremembe, z izjemo zime pod 0,5° C.

4 Razprava

Analiza je pokazala, da se bo do konca stoletja najbolj dvignila povprečna letna temperatura morja –1° C po optimističnem scenariju, 1,5° C po zmerno optimističnem in več kot 3° C po pesimističnem scenariju. Na površinskih vodah se kaže dvig povprečne letne temperature za 0,5° C po optimističnem



Slika 8: Časovni potek spremembe povprečne letne temperature podzemnih voda v Sloveniji do konca 21. stoletja za tri podnebne scenarije, z razponi odstopanj modelov. Srednje črte prikazujejo glajene mediane, ovojnice pa največjo in najmanjšo vrednost podnebnih modelov.

scenariju, okrog 1°C po zmerno optimističnem in več kot 2°C po pesimističnem scenariju glede na primerjalno obdobje 1981–2010. Manjše poraste povprečnih letnih temperatur se pričakuje na podzemnih vodah, kjer optimistični in zmerno optimistični scenarij predvidevata dvig za okrog $0,5^{\circ}\text{C}$, pesimistični scenarij pa blizu $1,5^{\circ}\text{C}$.

Analiza zanesljivosti nakazuje, da so ocenjene letne spremembe temperature vseh podsistemov voda statistično zanesljive. Modelski rezultati so si enotni, da se bo povprečna letna temperatura vode do konca stoletja povišala ne glede na podnebni scenarij (slika 11).

Sezonski pregled je pokazal na največje dvige temperature vode poleti in jeseni ter na nekoliko manjše pozimi in spomladi. Po pesimističnem scenariju se bo do konca 21. stoletja poletna in jesenska temperatura morja dvignila za prek 3°C , temperatura površinskih vodah za več kot 2°C in podzemnih vodah za dobro stopinjo Celzija. Zmerno optimistični scenarij na morju v poletni sezoni kaže na več kot 2°C višjo temperaturo, v ostalih sezonah pa okrog $1,5^{\circ}\text{C}$ nad referenčni obdobjem. Na površinskih vodah se kaže dvig sezonskih temperatur za okrog 1°C , na podzemnih vodah pa za okrog $0,5^{\circ}\text{C}$.

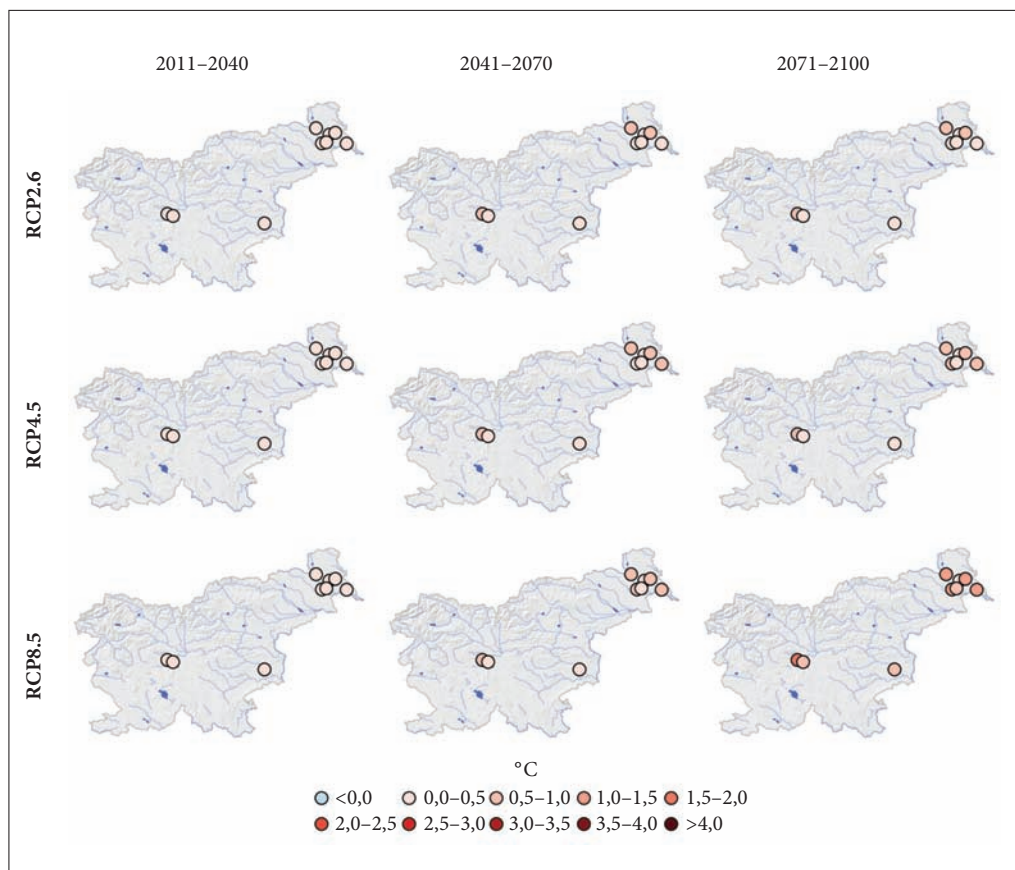
Zanesljivost sezonskih sprememb je večinoma visoka (sliki 12 in 13). Po pesimističnem in zmerno optimističnem scenariju z visoko zanesljivostjo pričakujemo dvig sezonskih temperatur

Preglednica 6: Razpon modelskih odklonov temperatur (°C) podzemnih voda po podnebnih scenarijih v 30-letnih obdobjih glede na referenčno obdobje 1981–2010 (MIN – minimum, MED – mediana, MAX – maksimum).

scenarij	letni čas	2011–2040			2041–2070			2071–2100		
		MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
RCP2.6	pomlad	–0,03	0,21	0,45	0,13	0,29	0,45	0,13	0,32	0,51
	poletje	0,19	0,32	0,46	0,40	0,42	0,43	0,29	0,39	0,49
	jesen	0,04	0,31	0,58	0,25	0,42	0,60	0,14	0,36	0,59
	zima	0,10	0,28	0,46	0,16	0,37	0,58	0,32	0,57	0,81
	leto	0,06	0,28	0,49	0,24	0,37	0,50	0,21	0,39	0,58
RCP4.5	pomlad	0,04	0,15	0,34	0,20	0,32	0,64	0,33	0,44	0,69
	poletje	0,02	0,23	0,35	0,45	0,52	0,69	0,40	0,54	0,80
	jesen	0,07	0,32	0,39	0,25	0,38	0,78	0,42	0,54	0,94
	zima	0,22	0,27	0,48	0,33	0,48	1,08	0,42	0,69	1,13
	leto	0,13	0,25	0,34	0,33	0,44	0,78	0,45	0,55	0,85
RCP8.5	pomlad	0,13	0,23	0,36	0,38	0,48	0,83	0,71	0,87	1,36
	poletje	0,22	0,29	0,38	0,38	0,55	0,78	0,94	1,07	1,64
	jesen	0,12	0,29	0,62	0,49	0,66	1,03	0,91	1,15	1,79
	zima	0,10	0,26	0,58	0,43	0,66	1,12	1,14	1,33	2,05
	leto	0,20	0,26	0,46	0,50	0,55	0,93	0,96	1,08	1,69

Preglednica 7: Število vodomernih postaj na podzemnih vodah po razredih odklonov povprečne letne temperature vode. Odkloni predstavljajo mediane modelskih rezultatov.

scenarij	obdobje	razredi odklonov (°C)			
		0,0–0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0
RCP2.6	2011–2040	9			
	2041–2070	6	3		
	2071–2100	5	4		
RCP4.5	2011–2040	9			
	2041–2070	5	4		
	2071–2100	4	5		
RCP8.5	2011–2040	9			
	2041–2070	4	5		
	2071–2100	1	3	4	1

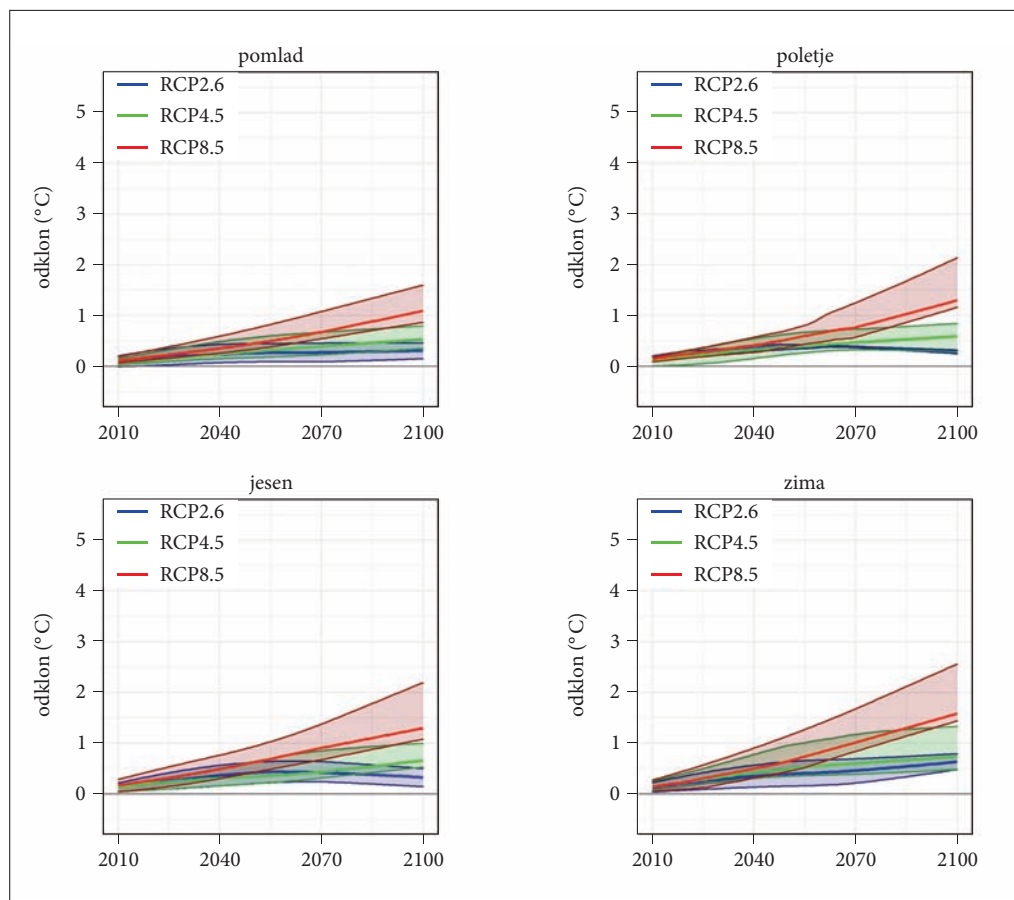


Slika 9: Geografska razporeditev odklonov povprečne letne temperature podzemnih voda glede na referenčno obdobje 1981–2010. Vrednosti odklonov predstavljajo mediane podnebnih modelov za tri podnebne scenarije.

na površinskih in podzemnih vodah. Po optimističnem scenariju so spremembe visoko zanesljive poleti ter jeseni.

Pri interpretaciji posameznih rezultatov se zavedamo, da ima izbrana metodologija napovedovanja temperatur vode na podlagi temperature zraka z regresijskimi modeli prednosti in pomanjkljivosti. Med prednostmi metode lahko izpostavimo relativno enostavnost ter robustnost, ki po našem mnenju omogoča pogled v trende temperatur vode v prihodnosti. Pomanjkljivost uporabljene metode je, da ne gre za termodinamično povezavo, temveč za korelacijsko metodo, ki zato tudi slabše napoveduje ekstremne vrednosti temperatur vode. Na temperaturo vode namreč poleg temperature zraka oziroma sončnega sevanja močno vplivajo lokalne geografske, predvsem pa hidromorfološke in geološke značilnosti.

Za modelski izračun temperatur smo uporabili mesečne vrednosti, v analizi pa so bile uporabljene povprečne letne in sezonske temperature, kar je dovolj natančno za splošne ocene temperature vode in predvideno gibanje temperature vode pod vplivom podnebnih sprememb, za zanesljivejše napovedovanje pa bi bili potrebni kompleksnejši modeli z upoštevanjem večjega števila naravnih in antropogenih dejavnikov.

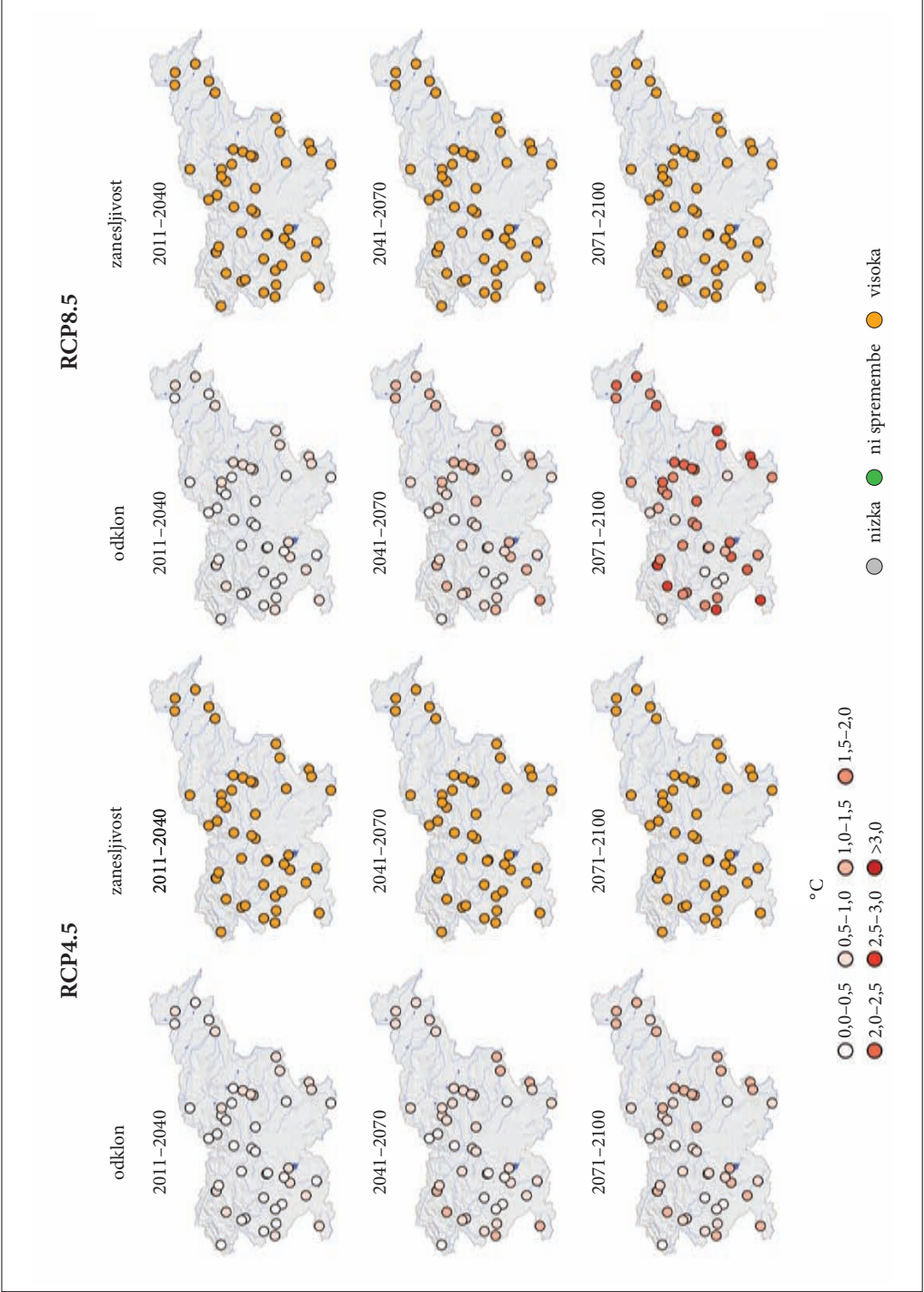


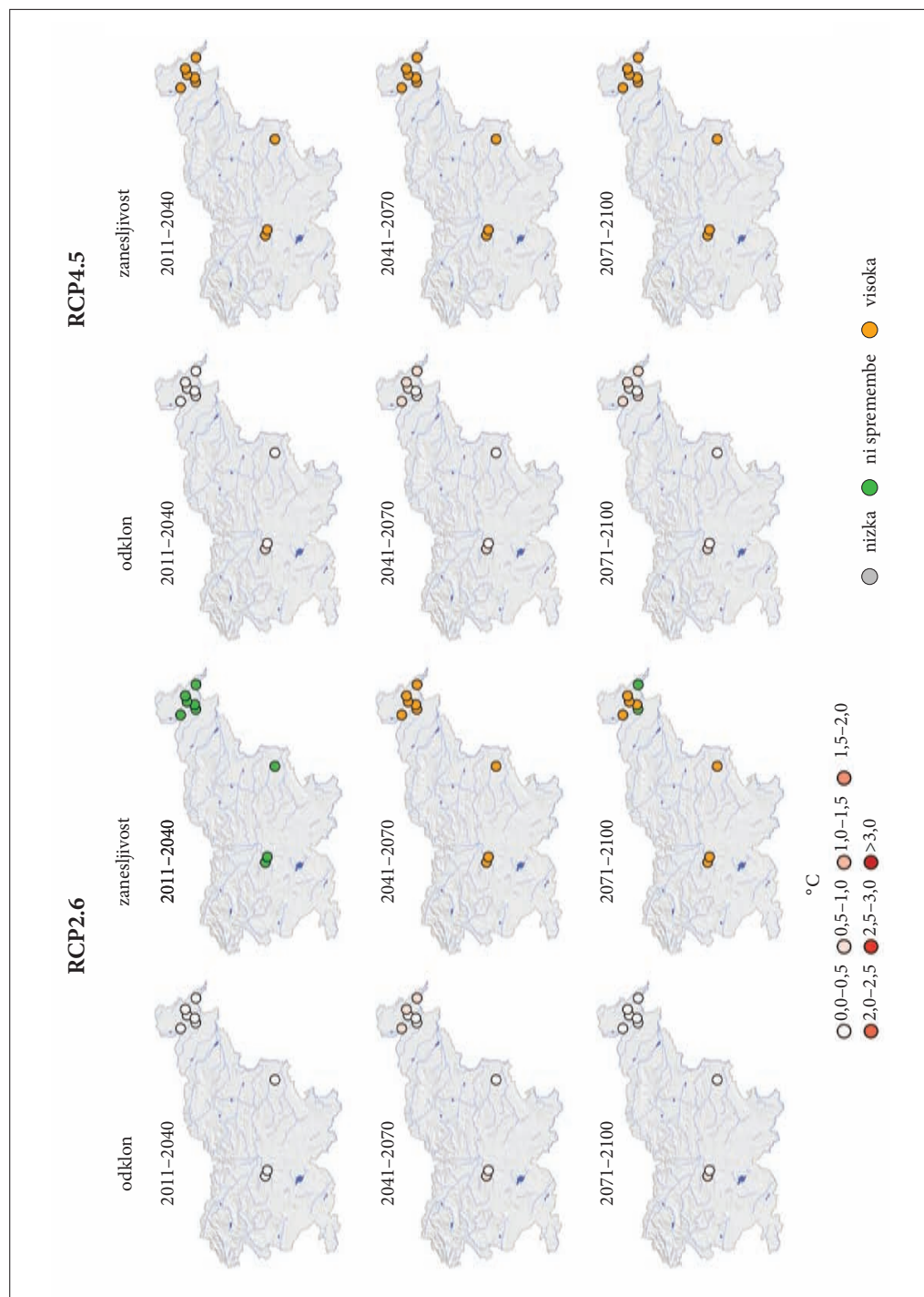
Slika 10: Časovni potek spremembe sezonskih temperatur podzemnih voda v Sloveniji do konca 21. stoletja za tri podnebne scenarije, z razponi odstopanj modelov. Srednje črte prikazujejo glajene mediane, ovojnice pa največjo in najmanjšo vrednost podnebnih modelov.

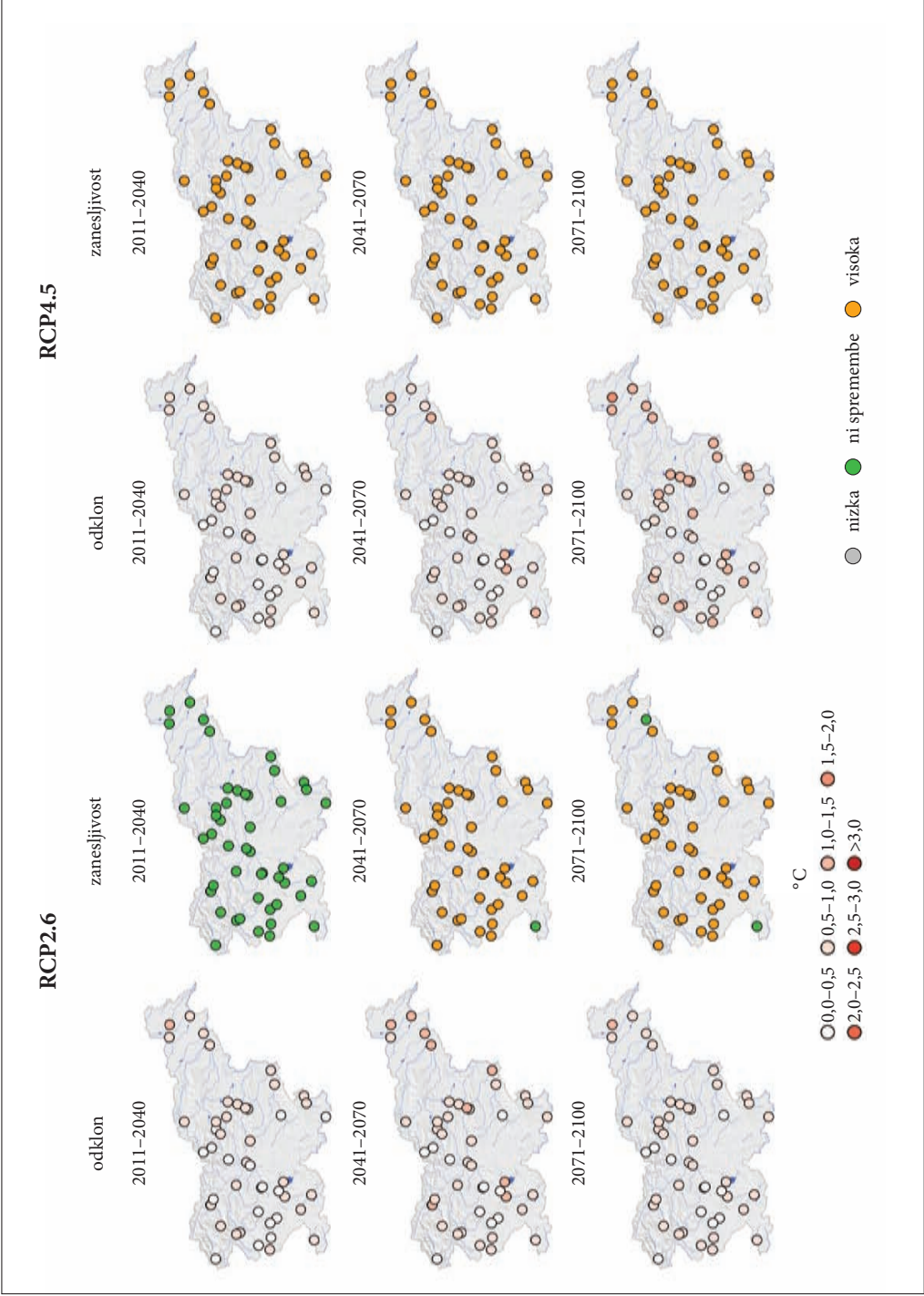
Slika 11: Povprečni letni odklon (mediana modelov) temperature izbranega obdobja od referenčnega obdobja in zanesljivost spremembe po vodomernih postajah površinskih voda in morja za scenarija RCP4.5 in RCP8.5. ► str. 71

Slika 12: Povprečni jesenski odklon (mediana modelov) temperature izbranega obdobja od referenčnega obdobja in zanesljivost spremembe po vodomernih postajah podzemnih voda za scenarija RCP2.6 in RCP4.5. ► str. 72

Slika 13: Povprečni jesenski odklon (mediana modelov) temperature izbranega obdobja od referenčnega obdobja in zanesljivost spremembe po vodomernih postajah površinskih voda in morja za scenarija RCP2.6 in RCP4.5. ► str. 73







5 Sklep

Raziskava je na raznolikem vzorcu vodomernih postaj v Sloveniji preverila povezavo med temperaturo zraka in temperaturo vode s ciljem napovedovanja temperature vode za prihodnja obdobja. Po vzoru preteklih raziskav smo s pomočjo regresijskih modelov opisali povezavo temperature zraka in vode ter jo aplicirali na podnebne scenarije. Ocena vpliva podnebnih sprememb na temperature vode v Sloveniji do konca 21. stoletja je bila izdelana za tri podnebne scenarije: optimistični (RCP2.6), zmer-no optimistični (RCP4.5) in pesimistični scenarij (RCP8.5). Opravljena je bila primerjava modelskih rezultatov z referenčnim obdobjem 1981–2010 ter preverjena statistična zanesljivost ocenjenih sprememb.

Potrdili smo povezavo med temperaturo zraka in temperaturo vode ter jo prek različnih regresijskih modelov izkoristili za oceno temperature vode pod vplivom podnebnih scenarijev. Raziskava je na primerih raznolikih vodomernih postaj po Sloveniji potrdila, da je na podlagi kakovostnih podatkovnih nizov temperature zraka in temperature vode mogoče ocenjevanje temperature vode. Obenem rezultati enotno kažejo na nadaljevanje trenda dvigovanja temperature vode, kar potrjuje jasne odzive temperature vode na podnebne spremembe tudi v prihodnje.

6 Viri in literatura

- Arismendi, I., Safeeq, M., Dunham, J. B., Johnson, S. L. 2014: Can air temperature be used to project influences of climate change on stream temperature? *Environmental Research Letters* 9-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084015>
- ARSO 2021: Hidrološki arhiv. Mesečne statistike. Medmrežje: http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (2. 3. 2021).
- Arvola, L., George, G., Livingstone, D., Järvinen, M., Blenckner, T., Dokulil, M., Jennings, E., Aonghusa, C. N., Nöges, P., Nöges, T., Weyhenmeyer, G. 2009: The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes. *The Impact of Climate Change on European Lakes*. Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4_6
- Bertalančič, R., Dolinar, M., Draksler, A., Honzak, L., Kobold, M., Kozjek, K., Lokošek, N., Medved, A., Vertačnik, G., Vlahović, Ž., Žust, A. 2018: Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Sintezno poročilo – prvi del, Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Medmrežje: http://www.meteo.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/OPS21_Porocilo.pdf (2. 3. 2021).
- Benz, S. A., Bayer, P., Winkler, G., Blum, P. 2018: Recent trends of groundwater temperatures in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 22-3. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-3143-2018>
- Bonacci, O., Trninić, D., Roje-Bonacci, T. 2008: Analysis of the water temperature regime of the Danube and its tributaries in Croatia. *Hydrological Processes* 22-7. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6975>
- Caldwell, P., Segura, C., Laird, S. G., Sun, G., McNulty, S. G., Sandercock, M., Boggs, J., Vose, J. M. 2014: Short-term stream water temperature observations permit rapid assessment of potential climate change impacts. *Hydrological Processes* 29-9. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.10358>
- Dokulil, M. 2014: Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. *Hydrobiologia* 731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1550-5>
- Draksler, A. 2016: Homogenizacija podatkovnih nizov temperatur vode ter analiza trendov na površinskih vodah, podzemnih vodah in morju, poročilo izvedbe 1. sklopa nalog. Interno poročilo projekta Ocena podnebnih sprememb do konca 21. stoletja. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana.
- Draksler, A. 2019: Ocena sprememb temperature vode v spremenjenem podnebj, končno poročilo. Interno poročilo projekta Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana.

- Draksler, A., Frantar, P., Savić, V. 2018: Trendi temperatur površinskih in podzemnih voda do leta 2015 v Sloveniji. *Ujma* 32.
- Draksler, A., Frantar, P., Savić, V., Vertačnik, G. 2017: Trendi temperatur vode v Sloveniji. Drugi slovenski kongres o vodah. Ljubljana.
- Edinger, J. E., Duttweiler, D. W., Geyer, J. C. 1968: The response of water temperature to meteorological conditions *Water Resources Research* 4-5. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR004i005p01137>
- EEA – European Environment Agency 2009: Regional Climate Change and Adaptation: The Alps Facing the Challenge of Changing Water Resources. EEA Report 8/2009. Copenhagen. DOI: <https://doi.org/10.2800/12552>
- EEA – European Environment Agency 2017: Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2016: An Indicator-based Report. EEA Report 1/2017. Copenhagen. DOI: <https://doi.org/10.2800/534806>
- Erickson, T. R., Stefan, H. G. 2000: Linear air/water temperature correlations for streams during open water periods. *Journal of Hydrologic Engineering* 5-3. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:3\(317\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(317))
- Frantar, P. 2004: Analiza temperaturnega režima in pojava ledu na Bohinjskem jezeru. *Ujma* 17-18.
- Frantar, P. 2012: Temperaturni režimi rek v Sloveniji v obdobju 1976–1990 in spremembe režimov v obdobju 1991–2005. *Geografski vestnik* 84-2.
- Frantar, P. 2013: Climate change effects on temperature and ice of the lake Bohinj, Slovenia. 32nd International Conference on Alpine Meteorology. Ljubljana.
- Hausfather, Z. 2019: Explainer: The high-emissions 'RCP8.5' global warming scenario. *Carbon Brief*, 21. 8. 2019. Medmrežje: <https://www.carbonbrief.org/explainer-the-high-emissions-rcp8-5-global-warming-scenario> (2. 3. 2021).
- Hemmerle, H., Bayer, P. 2020: Climate change yields groundwater warming in Bavaria, Germany. *Frontiers in Earth Science* 13-8. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.575894>
- Hrvatín, M., Zorn, M. 2017a: Trendi temperatur in padavin ter trendi pretokov rek v Idrijskem hribovju. *Geografski vestnik* 89-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV89101>
- Hrvatín, M., Zorn, M. 2017b: Trendi pretokov rek v slovenskih Alpah med letoma 1961 in 2010. *Geografski vestnik* 89-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV89201>
- IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. Medmrežje: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (2. 3. 2021).
- Islam, S. U., Hay, R. W., Déry, S. J., Booth, B. 2019: Modelling the impacts of climate change on riverine thermal regimes in western Canada's largest Pacific watershed. *Scientific Reports* 9. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47804-2>
- IzVRS – Inštitut za vode Republike Slovenije 2012: Načrt upravljanja z morskim okoljem. Začetna presoja morskih voda v pristojnosti Republike Slovenije: Bistvene lastnosti in značilnosti morskih vod. Ljubljana.
- Kędra, M. 2020: Regional response to global warming: Water temperature trends in semi-natural mountain river systems. *Water* 12-1. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12010283>
- Livingstone, D., Lotter, A. 1998: The relationship between air and water temperatures in lakes of the Swiss Plateau. *Journal of Paleolimnology* 19. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1007904817619>
- McCombie, A. M. 1959: Some relations between air temperatures and the surface water temperature of lakes. *Limnology and Oceanography* 4-3. DOI: <https://doi.org/10.4319/lo.1959.4.3.0252>
- Menberg, K., Blum, P., Kurylyk, B. L., Bayer, P. 2014: Observed groundwater temperature response to recent climate change. *Hydrology and Earth System Sciences* 18-11. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-18-4453-2014>
- Mohseni, O., Stefan, H. G., Erickson, T. R. 1998: A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resources Research* 34-10. DOI: <https://doi.org/10.1029/98WR01877>

- MOP – Ministrstvo za okolje in prostor 2017: Načrt upravljanja z morskim okoljem 2017–2021, priloga. Medmrežje: <https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Dokumenti/Voda/NUMO/nacrt-UMD.pdf> (2. 3. 2021).
- Morrill, J. C., Bales, R. C., Conklin, M. H. 2005: Estimating stream temperature from air temperature: Implications for future water quality. *Journal of Environmental Engineering* 131-1. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:1\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:1(139))
- Pastor, F., Valiente, J. A., Palau, J. L. 2018: Sea surface temperature in the Mediterranean: Trends and spatial patterns (1982–2016). *Pure and Applied Geophysics* 175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1739-z>
- Perroud, M., Goyette, S. 2010: Impact of warmer climate on lake Geneva water-temperature profiles. *Boreal Environment Research* 15.
- Persson, I., Jones, I., Sahlberg, J., Dokulil, M., Hewitt, D., Leppäranta, M., Blenckner, T. 2005: Modeled thermal response of three European lakes to a probable future climate. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 29-2. DOI: <https://doi.org/10.1080/03680770.2005.11902762>
- Pisano, A., Marullo, S., Artale, V., Falcini, F., Yang, C., Leonelli, F. E., Santoleri, R., Buongiorno Nardelli, B. 2020: New evidence of Mediterranean climate change and variability from sea surface temperature observations. *Remote Sensing* 12-1. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12010132>
- Pletterbauer, F., Melcher, A., Graf, W. 2018: Climate change impacts in riverine ecosystems. *Riverine Ecosystem Management*. Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_11
- Punzet, M., Voß, F., Voß, A., Kynast, E., Bärlund, I. 2012: A global approach to assess the potential impact of climate change on stream water temperatures and related in-stream first-order decay rates. *Journal of Hydrometeorology* 13-3. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0138.1>
- Rabi, A., Hadzima-Nyarko, M., Šperac, M. 2015: Modelling river temperature from air temperature: Case of the River Drava (Croatia). *Hydrological Sciences Journal* 60-9. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.914215>
- Riedel, T. 2019. Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology* 572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059>
- Shaltout, M., Omstedt, A. 2014: Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologia* 56-3. DOI: <https://doi.org/10.5697/oc.56-3.411>
- Shuter, B. J., Schlesinger, D. A., Zimmerman, A. P. 1983: Empirical predictors of annual surface water temperature cycles in North American lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40-10. DOI: <https://doi.org/10.1139/f83-213>
- SST CEAMed 2021: Mediterranean sea surface temperature portal, Temperature. Medmrežje: <http://www.ceam.es/ceamet/SST/index.html> (2. 3. 2021).
- Stefan, H. G., Preud'homme E. B. 1993: Stream temperature estimation from air temperature. *Water Resources Bulletin* 29-1. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1993.tb01502.x>
- Šamanić, L. 2018: Vpliv srebrnoproge napihvalke *Lagocephalus sceleratus* na ekosistem vzhodnega Mediterana. Magistrsko delo, Pedagoška fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- van Vliet, M., Ludwig, F., Zwolsman, G., Weedon, G., Kabat, P. 2011: Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. *Water Resources Research* 47-2. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010WR009198>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K. 2011: The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* 109. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vertačnik, G., Vičar, Z., Bertalančić, R. 2015: Kontrola in homogenizacija podnebnih podatkov. Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011. Ljubljana. Medmrežje: <https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/Kontrola%20in%20homogenizacija%20splet.pdf> (2. 3. 2021).

- Vodenik, B., Robič, M., Kobold, M. 2008: Vpliv podnebnih sprememb na temperaturo površinskih voda. 19. Mišičev vodarski dan 2008. Maribor.
- Webb, M. S. 1974: Surface temperatures of Lake Erie. *Water Resources Research* 10-2. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR010i002p00199>

7 Summary: Climate change impacts on water temperature in Slovenia in the 21st century

(translated by the author)

Water temperature of rivers, lakes, sea and groundwater is one of climate change indicators. Up until now, most of the research was done on river temperature trend analysis, with less research done considering climate change impacts. Several studies based on the analysis of recent changes based on monitoring data, an increased trend for water temperatures was observed. Under climate scenarios, the future air temperature is usually researched. Due to high air-water correlation, the higher water temperatures are also predicted.

In Slovenia and its surroundings, the increasing temperature trends of rivers in the Alps, Dinaric Mountains, Carpathians and other regions were confirmed. In Slovenia the annual, spring and summer water temperature rises were confirmed for all surface waters. Higher temperatures are often related to lower discharges. In Slovenia, a significant increase in water temperature is observed after the year 1990.

The sea temperature is increasing in the whole of the Mediterranean and will continue to rise till the end of the century with an increase trend between 1.5 and 3.1 °C. The Adriatic Sea temperature could increase by 0.038 °C annually with predicted highest seasonal increase in the spring.

Groundwater temperatures on mostly open aquifers also show increasing trend, which is also connected to the increase of air temperatures. The previous papers show that there is higher correlation between air temperature and water temperature on shallower aquifers of up to 100 m of depth.

Based on the assumption of high correlation between air and water temperature (of all surface waters and groundwater) different methodologies are used to predict water temperature based on air temperature. The methodologies used are various regression models for various periods (weekly, monthly, yearly). The linear or nonlinear regression models are most widely used due to their robustness. Stochastic models are recognised as better models, but the data used should be on a daily timescale. Some authors argue that the best results give the use of neural networks – multilayer perception methodology. Based on the overview of all methodologies the linear regression is less accurate than the stochastic method, however it is still statistically very significant and easier to apply.

In this paper, a projection of water temperature from 2011 to 2100 for surface (rivers, lakes, sea) and groundwater in Slovenia was performed. The prediction and analysis was conducted for 57 water gauging stations: 47 stations on surface waters, 9 on groundwater and 1 station at sea.

The prediction of water temperature was done based on the correlation between homogenised monthly air and water temperature data for selected gauging stations in Slovenia. The relationship between air temperature and water temperature was estimated for the period 1969–2011 for groundwater and the period 1956–2011 for surface waters and the sea. Then, regression models were prepared to identify the air-water temperature relationship at each location. A non-linear regression model or a linear regression model were used, depending on the best fit. In some cases, due to time lag in water temperature response to air temperature in the second half of the year, we also used twofold regression models to describe the air-water temperature relationship.

The quality of the models was evaluated with two tests; the Nash-Sutcliffe Coefficient (NSC) and the Root Mean Squared Error (RMSE), and the models with the best results were selected:

- Onefold nonlinear sigmoidal regression model on monthly data was used for 22 stations on surface waters.

- Twofold nonlinear sigmoidal regression model on monthly data was used at 14 surface water locations (12 river stations and 2 lake stations) and 1 location at sea. The first regression model included data from January to July, and the second regression model from August to December.
- Onefold linear regression model on monthly data was used for 4 water gauging stations on surface waters.
- Twofold linear regression model on monthly data was used at 7 surface water gauging stations and 9 groundwater gauging stations. In surface waters, the first regression model included data from January to July, and the second regression model from August to December. For groundwater, months February to August were used for the first part of the regression model and September to January for the second part.

The assessment of the future water temperature change is based on air temperature data taken from global climate scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) that have been mapped to Slovenia by regional climate models. Grid value of modelled monthly air temperature at gauging stations locations was used as input for regression models in order to calculate the future water temperature by the end of 21st century. This was done for 14 climate model combinations in 3 climate change scenarios: RCP2.6 (optimistic), RCP4.5 (moderate) and RCP8.5 (pessimistic). The results show an approximation of the three main predictions of water temperature changes in Slovenia due to the expected climate change by the end of the 21st century.

Monthly water temperature for all 57 water gauging stations was aggregated to seasonal and annual averages. The analysis of changes in water temperatures was performed by 30-year periods. The period 1981–2010 represents the reference period. The minimum, maximum and the median value of models within scenario were calculated, thus obtaining the model range of deviation for each climate scenario.

Analysis of climate scenario models shows that by the end of the 21st century, according to median of models, average annual water temperatures will rise in all water types (surface waters, groundwater, sea). The sea temperature will increase the most, followed by surface waters, and the lowest increase in annual water temperature is expected for groundwater.

Seasonal analysis shows similar results: the highest increase in all seasons at sea, followed by surface water and groundwater. Seasonally, the highest increase in temperature is expected in summer and autumn, and less in winter and spring.

The results for surface waters show that the average annual temperature of rivers and lakes will increase by 0.64 °C by the end of the 21st century (2071–2100) according to the optimistic scenario RCP2.6, by 0.95 °C according to the moderate RCP4.5 scenario, and by 1.83 °C according to the pessimistic RCP8.5 scenario.

The RCP8.5 scenario envisages an increase in the average annual surface water temperature by more than 1.5 °C at 36 out of the 47 water gauging stations by the end of the 21st century. According to RCP4.5 scenario, deviations are lower than 1.5 °C at all stations, and according to RCP2.6 scenario, lower than 1 °C.

The analysis of the geographical distribution of temperature change shows higher increases in the middle and downstream river sections, while slightly smaller changes in the headwaters and near karstic springs. The increase in the average annual temperature of lakes will be higher than on rivers. Analysis of seasonal changes shows the highest increase in summer temperatures with similar geographical distribution as for annual changes.

Analysis for the sea shows that the average annual sea temperature will increase, regardless of the scenario considered, from more than 3 °C to less than 1 °C. Seasonal changes show that under scenarios RCP4.5 and RCP8.5, sea temperatures will rise in all seasons, the most in summer.

Groundwater temperature will increase, however, changes are expected to be smaller. The highest increase of average annual temperature is predicted under RCP8.5, with 1.1 °C in the period 2071–2100. Climate scenarios RCP4.5 and RCP2.6 indicate minor changes, RCP2.6 by 0.4 and RCP4.5 by 0.6 °C.

The seasonal analysis shows greater changes in temperatures in winter and autumn, where according to the RCP8.5 scenario, an increase of 1.3 and 1.2 °C is expected by the end of the 21st century. The increase in average spring groundwater temperature is lower and estimated to below 1 °C.

In the RCP4.5 scenario, the seasonal increases are between 0.4 °C in spring and 0.7 °C in winter, with summer and autumn showing 0.5 °C higher water temperatures compared to the reference period. According to the RCP2.6 scenario, changes, except in winter, are below 0.5 °C.

The methodology used for predicting water temperatures based on air temperature with regression models has advantages and disadvantages. Among the advantages the relative simplicity and robustness can be highlighted. On the other hand, the method does not reflect a thermodynamic connection but a correlation where extreme water temperatures cannot be fully predicted. There were also no natural and anthropogenic factors included in the prediction of future water temperatures.

Nevertheless, the research confirms that climate change will have an impact on water temperatures in Slovenia with increased future temperature of water in rivers, lakes, groundwater and sea.